

INFORME UIT-R M.2076

Factores que reducen la interferencia causada por los radares de radiolocalización y del servicio de exploración de la Tierra por satélite/servicio de exploración espacial (activo) a los radares de radionavegación marítima y aeronáutica en las bandas 9,0-9,2 GHz y 9,3-9,5 GHz y entre los radares del servicio de exploración de la Tierra por satélite/servicio de exploración espacial (activo) y los radares de radiolocalización en las bandas 9,3-9,5 GHz y 9,8-10,0 GHz

(2006)

1 Introducción

La Cuestión UIT-R 234/8 propone estudiar las características técnicas, los criterios de calidad de funcionamiento y otros factores de los sistemas de radiolocalización y radionavegación que funcionan en las bandas 9 000-9 200 MHz y 9 300-9 500 MHz así como los criterios de protección contra la interferencia aplicables a dichos sistemas. Además, la Resolución 747 (CMR-03) formula el punto 1.3 del orden del día de la CMR-07 que solicita examinar la posibilidad de elevar a la categoría primaria la atribución al servicio de radiolocalización en las bandas de frecuencias 9 000-9 200 MHz y 9 300-9 500 MHz, y de ampliar en 200 MHz las atribuciones existentes a título primario compartido al servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS) (activo) y al servicio de investigación espacial (SIE) (activo) de la banda 9 500-9 800 MHz. En la Recomendación UIT-R M.1796 figuran las características de radares terrenales representativos en la banda 8 500 MHz-10,5 GHz. El presente Informe es una contribución adicional a los estudios requeridos por la Cuestión UIT-R 234/8 y la Resolución 747 (CMR-03).

En la Recomendación UIT-R M.1372-1 – Utilización eficaz del espectro radioeléctrico por las estaciones de radar del servicio de radiodeterminación, se describen algunas de las principales técnicas de supresión de la interferencia generalmente utilizadas en radares. La Recomendación hace hincapié en el procesamiento posterior a la detección, pero una de las técnicas descritas se puede aplicar antes de la detección. Los factores expuestos en el presente Informe abarcan algunos de los que se cubren en la Recomendación UIT-R M.1372 y otros que los complementan.

1.1 Resumen de las conclusiones

La principal forma de degradación por interferencia que probablemente cause la interferencia impulsiva, es el aumento de la tasa de falsas alarmas. Esto se contrarresta de forma natural mediante algunas características comunes de los radares, como lóbulos laterales de antena pequeños y la emisión asíncrona de impulsos. Son convenientes las respuestas a impulsos individuales, tales como constante de tiempo rápida, los efectos de filtrado adaptable y otros efectos de reducción de la duración de los impulsos. El tipo de acoplamiento que puede causar más problemas es el acoplamiento de lóbulo lateral a haz principal.

Con un diseño adecuado de los radares se puede reducir la interferencia impulsiva de muchas maneras, entre las que se encuentran:

- técnicas de impulsos múltiples, incluido el procesamiento M de N ;
- supresión deliberada de impulsos asíncronos individuales;
- percepción de los efectos de los impulsos asíncronos mediante un examen de los resultados del filtro de Doppler efectuado con posterioridad al procesamiento;

- procesos no lineales y variables en el tiempo, como el control temporal de la sensibilidad y la limitación;
- correlación entre exploraciones.

2 Tipos de radares que funcionan en las bandas en cuestión

Hay varios tipos de radares de radionavegación que funcionan en las bandas 9 000-9 200 MHz y 9 300-9 500 MHz. Los radares de radionavegación aeronáutica situados en tierra funcionan en la banda 9 000-9 200 MHz; entre ellos se encuentran los radares de precisión de aterrizaje (PAR, *precision-approach radars*) y los radares de los equipos de detección en la superficie de los aeropuertos (ASDE, *airport surface detection equipment*). Se trata de radares de vigilancia de blanco discreto. La banda 9 300-9 500 MHz es utilizada por un gran número de radares de radionavegación marítima, la mayoría de los cuales van a bordo de barcos, y por radares de detección de tormentas aerotransportados. Los sistemas marítimos son radares de blanco discreto y los sistemas aerotransportados son radares de blanco distribuido.

El servicio de radiolocalización funciona con atribución a título secundario en las bandas 9 000-9 200 MHz y 9 300-9 500 MHz. Los radares de radiolocalización meteorológicos instalados en tierra que funcionan en la banda 9 300-9 500 MHz tienen prioridad con respecto a los demás radares de radiolocalización (número 5.475 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR)). Los radares de radiolocalización también funcionan con atribuciones a título primario en las bandas 9 500-9 800 MHz y 9 800 MHz-10,0 GHz.

Los radares de apertura sintética (SAR, *synthetic-aperture radars*) a bordo de vehículos espaciales de los servicios SETS/SIE (activo) funcionan actualmente en la banda 9,5-9,8 GHz con atribuciones a título primario compartido. La propuesta de extender esa atribución en 200 MHz viene motivada por el deseo de mejorar la resolución en distancia de los SAR.

3 Tipos de posibles efectos de la interferencia

Los dos tipos de efecto más importantes que los radares del servicio de radiolocalización o de los servicios SETS/SIE (activos) pueden causar sobre la degradación de la calidad de funcionamiento en los radares de vigilancia de blanco discreto como los PAR y los ASDE o sobre los radares de navegación marítima se pueden clasificar en:

- detecciones de blanco fallidas;
- generación de detecciones de blanco falso o «falsas alarmas» y seguimiento de blancos falsos.

Puede considerarse que estos dos efectos son, respectivamente, una disminución de la probabilidad de detección y un aumento de la probabilidad de falsa alarma.

Aunque los radares de radiolocalización o del SETS/SIE (activos) podrían posiblemente causar un cierto grado de desensibilización (detecciones de blanco fallidas, etc.), es de esperar que ese efecto sea pequeño, como lo han demostrado varias campañas de medición, por lo que se centrará la atención en la generación de blancos falsos.

Aun cuando en el radar terrenal se haya diseñado correctamente el funcionamiento de «tasa de falsas alarmas constante» (CFAR, *constant-false-alarm-rate*), las señales impulsivas de otros radares aumentan la posibilidad de que se generen detecciones de blancos falsos. No obstante, en el resto del Informe se muestra que estos efectos pueden evitarse en gran medida con un diseño adecuado. Los radares de blanco discreto, incluidos los radares de seguimiento especializados en un blanco, también están expuestos a un empeoramiento de los errores de determinación de la posición y de los errores de clasificación del blanco causados por señales no deseadas. Sin embargo, es más

probable que estos efectos se produzcan por una interferencia continua similar al ruido que por una interferencia impulsiva originada por otros radares.

La degradación de la calidad de funcionamiento que los radares de radiolocalización y del SETS podrían causar en los radares de blanco distribuido, incluidos los radares de detección de tormentas o los radares de vigilancia meteorológicas, consiste en falsas alarmas discretas (por ejemplo, de un solo píxel), (estas alarmas que en la jerga meteorológica se denominan «pecas») y la introducción de imprecisiones en los cálculos de las mediciones de fenómenos meteorológicos. La degradación que cualquier tipo de interferencia puede causar en los radares de generación de imágenes de apertura sintética se interpreta en la comunidad de las ciencias del espacio como un aumento de la varianza de la potencia de salida del procesador en un píxel cualquiera¹.

Estos efectos son diferentes al efecto que la interferencia continua similar al ruido causa en los radares de blanco discreto con control efectivo de la tasa de falsas alarmas. En ese caso, la probabilidad de que ocurran falsas alarmas tiende a permanecer constante, pero la curva de probabilidad de detección en función de la distancia al blanco o de la sección transversal del radar (RCS, *radar cross section*) sufre un corrimiento inevitable hacia una distancia menor o hacia una RCS mayor a medida que aumenta la potencia de la señal no deseada. Se trata de una desensibilización generalizada que afecta principalmente a los blancos pequeños, distantes o mal iluminados debido a condiciones de propagación desfavorables tales como propagación multitrayecto o propagación por conductos adversa. También causa degradación de otras funciones, tales como la precisión del seguimiento. Sin embargo, este documento no abarca la interferencia continua similar al ruido.

4 Características de reducción de interferencia que normalmente poseen los radares

Los efectos de la interferencia pueden disminuirse mediante acoplamiento de potencia débil o transitorio, ciertas no linealidades de los receptores, ganancia variable con el tiempo, procesamiento de señales, procesamiento posterior y separación de la frecuencia de las portadoras. En las interacciones entre radares, la separación en frecuencia no siempre es necesaria para un funcionamiento compatible, porque de forma natural o mediante un diseño adecuado puede lograrse un alto grado de aislamiento en el acoplamiento de potencia y en el tiempo. Puede aparecer aislamiento por desacoplo de polarización en algunas combinaciones de radares de radiolocalización con radares a bordo de vehículos espaciales, pero eso no se puede garantizar para el caso general ya que los radares de un servicio con atribuciones frecuentemente utilizan polarización horizontal, vertical y/o circular.

En los puntos que siguen se identifican los mecanismos concretos que contribuyen a reducir los efectos de la interferencia. Muchos de estos mecanismos se aplican a impulsos originados en radares de radiolocalización o en sensores a bordo de vehículos espaciales y que se acoplan a radares marítimos, aerotransportados y de control del tráfico aéreo, mientras que otros se aplican principalmente a radares pertenecientes a una sola de esas categorías.

¹ Proyecto de revisión de la Recomendación UIT-R RS.1166 – Criterios de calidad de funcionamiento y de interferencia para sensores activos a bordo de vehículos espaciales.

4.1 Aislamiento en el acoplamiento de potencia (efectos logrados mediante antenas)

La interacción entre dos radares de tipos diferentes por lo general tiene en cuenta el asincronismo entre los haces de exploración de las dos antenas. Este asincronismo está prácticamente garantizado cuando uno de los radares es de radiolocalización y el otro es de radionavegación, ya que como los radares fueron diseñados para fines diferentes, las características de sus sistemas son también diferentes. La exploración asíncrona puede mejorarse si en la interacción intervienen radares de radiolocalización «tridimensionales», que emplean haces puntuales que exploran en elevación y en acimut, en contraposición a los radares de navegación diseñados para su utilización en superficie (control marítimo y de tráfico aéreo), que por lo general son «bidimensionales»; es decir, sólo exploran en acimut. Ocho de los cerca de 14 radares de radiolocalización descritos en la Recomendación UIT-R M.1796 poseen haces puntuales que exploran en elevación y en acimut. Esto significa que los haces puntuales de estos radares de radiolocalización pasan la mayor parte del tiempo explorando regiones por encima del horizonte, donde no se pueden acoplar fuertemente con los radares de radionavegación diseñados para superficie o, en el caso de los radares aerotransportados, regiones con diversos ángulos de elevación negativos, de forma que iluminan sólo ocasionalmente un radar de navegación situado en la superficie o aerotransportado particular. Los radares de radiolocalización más potentes son diseñados para superficie y poseen nulos de radiación en el horizonte, de forma que su acoplamiento con los radares de radionavegación para superficie es débil. Además, los radares de radiolocalización a menudo utilizan sistemas electrónicos de control y exploración siguiendo trayectorias que son deliberadamente aleatorias o casi aleatorias ya que se adaptan al entorno explorado. En dichos casos, el haz principal del radar de radiolocalización no se orienta periódicamente hacia el radar de navegación sino sólo a intervalos irregulares. Esto hace que sea poco probable que los radares de radionavegación de blanco discreto confundan con blancos válidos las señales de radar interferentes de haz principal a haz principal. En cualquier caso, el hecho de que los haces principales de todos los radares sean estrechos hace que la fracción de tiempo durante el cual prevalece la conjunción de haz principal a haz principal sea extremadamente pequeña. En consecuencia, las únicas situaciones que pueden plantear problemas son:

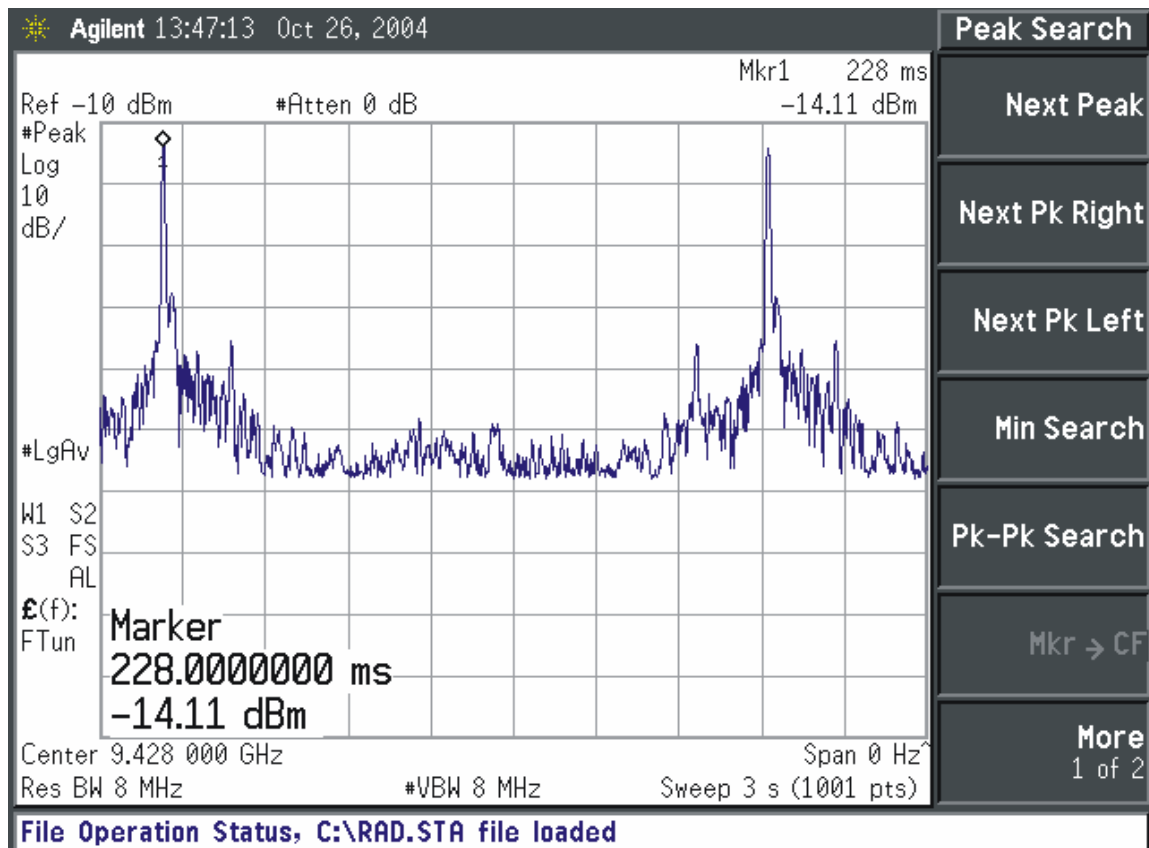
- lóbulos laterales del radar de radiolocalización dirigidos hacia lóbulos laterales del radar de radionavegación;
- haz principal del radar de radiolocalización dirigidos hacia lóbulos laterales del radar de radionavegación; y
- lóbulos laterales del radar de radiolocalización dirigidos hacia el haz principal del radar de radionavegación.

4.1.1 Acoplamiento de lóbulo lateral a lóbulo lateral

La mayoría de los lóbulos laterales de los radares de radiolocalización y de radionavegación poseen ganancias que son al menos 30 dB inferiores a las ganancias del haz principal correspondiente. De hecho, los niveles medianos de los lóbulos laterales de ese tipo de antena de alta ganancia tienden a ser aproximadamente -10 dBi y, por tanto, el factor de reducción del lóbulo lateral mediano es normalmente del orden de 40 dB. Los radares de navegación marítima que funcionan en torno a los 10 GHz normalmente utilizan antenas con elementos radiantes de guías ranuradas. Por ello, cuentan con una capacidad de reducción de lóbulos laterales bastante buena. Además, poseen haces relativamente estrechos en el plano del acimut. En la Fig. 1 se presenta un ejemplo de diagrama de antena en el plano acimutal, medido en un radar de navegación marítima comercial que funciona en la banda 9,3-9,5 GHz. Como se aprecia en la figura, el lóbulo lateral más potente se atenúa unos 25 dB y el nivel de potencia del lóbulo lateral mediano es al menos 47 dB menor que la ganancia del haz principal.

FIGURA 1

Diagrama de ganancia de antena en el plano acimutal de un radar de navegación marítima que funciona en la banda de 10 GHz



12076-01

Este tipo de funcionamiento no se ve reflejado en la mayor parte de los valores de ganancia de lóbulo lateral que se han publicado, incluidos los que figuran en la Recomendación UIT-R M.1796, ya que las especificaciones y las normas únicamente indican los niveles de los lóbulos laterales cercanos más grandes, lo cual es comprensible. Como las antenas únicamente pueden concentrar la energía y no la amplifican, la ganancia en el haz principal se logra únicamente disminuyendo la ganancia directiva en la mayoría de las otras direcciones a niveles inferiores a la media de la ganancia directiva calculada para todas las direcciones $4\pi(\text{sr})$, que es obligatoriamente igual a 0 dBi. Los valores indicados para las ganancias de haz principal corresponden a ganancias de potencia, que tienen en cuenta las pérdidas óhmicas; es decir, la disipación de la energía que la antena no puede radiar. Estos valores son, por tanto, inferiores en varios dB a las ganancias directivas pertinentes. La ganancia de potencia de todo el diagrama de antena en todos los $4\pi(\text{sr})$ del ángulo es inferior en el mismo factor que la correspondiente ganancia directiva, por lo que la ganancia de potencia media de toda la zona abarcada por los lóbulos laterales no podría nunca ser superior a unos -3 dBi. Un diseño adecuado concentra la parte mayor de la energía radiada en la zona del haz principal y disminuye más los lóbulos laterales. En consecuencia, la mayoría de los acoplamientos de lóbulo lateral a lóbulo lateral son normalmente de 66 a 80 dB inferiores al acoplamiento de haz principal a haz principal.

Por tanto, salvo cuando la distancia de separación es muy pequeña, los impulsos acoplados a través de los lóbulos laterales son por lo general demasiado débiles como para ocasionar falsas alarmas.

Si las antenas tienen aperturas rectangulares o casi rectangulares suelen concentrar la ganancia de lóbulo lateral en crestas situadas en planos que contienen los ejes longitudinal y transversal de la apertura, en los que la media de la ganancia de los lóbulos laterales puede ser superior a -10 dBi.

En dichos casos los lóbulos laterales de todos los demás planos se disminuyen a valores con una media inferior a -10 dBi. Además, las falsas alarmas provocadas por el acoplamiento de lóbulo lateral a lóbulo lateral se dispersarán aleatoriamente en una amplia gama de valores de acimut y, por tanto, tienden a no aparecer como blancos.

4.1.2 Acoplamiento de haz principal a lóbulo lateral

A excepción de los transpondedores de radiofaros de baja potencia, los radares de radiolocalización que operan en estas bandas, y que se describen en la Recomendación UIT-R M.1796, normalmente tienen ganancias de antena en la gama que va desde unos 28 hasta 42 dBi. Los radares meteorológicos tienen una ganancia que puede alcanzar 46 dBi. Los radares primarios presentan unas anchuras de haz de acimut estrechas, entre $1,5^\circ$ y $5,75^\circ$ a 3 dB y menos, mientras que los radares meteorológicos tienen haces de tan solo unos $0,9^\circ$. Si los 360° del acimut se cubren uniformemente, como suele ser el caso, sus haces principales iluminarán habitualmente otros radares durante no más del $1,5/360 * 100 = 0,42\%$ al $5,75/360 * 100 = 1,6\%$ del tiempo; porcentaje que puede llegar a ser tan pequeño como el $0,9/360 * 100 = 0,25\%$ del tiempo para los radares meteorológicos; y los numerosos radares que exploran en elevación los iluminarán con los haces principales del radar de radiolocalización con una frecuencia aun mucho menor. Estos porcentajes tan bajos no garantizan de por sí que haya compatibilidad, pero son importantes en virtud de varios hechos:

- la iluminación ocasional se produce a intervalos que difieren de los periodos de exploración de los radares de radionavegación;
- la interferencia es asíncrona y se asemeja a impulsos;
- cualquier efecto causado por la interferencia tiende a convertirse en una falsa alarma.

En consecuencia, las falsas alarmas, incluidas las aparentes variaciones meteorológicas momentáneas, causadas por el haz principal de los radares de radiolocalización de haz giratorio normalmente se desplazarán a través de los acimutes aparentes del radar de radionavegación, y por lo general caerán describiendo una espiral en la pantalla del indicador de posición en el plano (PPI, *plan-position indicator*). Salvo que sean demasiado densas, estas falsas alarmas pueden descartarse visualmente o mediante la aplicación de algoritmos de procesamiento tipo seguimiento y exploración. Los radares de radiolocalización que poseen sistemas de control del haz electrónicos a menudo realizan la exploración de forma pseudoaleatoria ya que no están forzados a llevar a cabo la exploración a una velocidad angular uniforme. Cuando esta exploración no uniforme se hace en el mismo plano de exploración (normalmente uniforme) de un radar de radionavegación, las falsas alarmas que pueden aparecer a través del haz principal de radiolocalización se distribuirán aleatoriamente en un amplio sector acimutal del radar de radionavegación y, por tanto, no se correlacionarán formando huellas de blancos falsos.

4.1.3 Supresión de lóbulos laterales

Una característica opcional que a veces se incluye en los radares consiste en la supresión de los lóbulos laterales [Skolnik, 1990; Maisel, 1968]. Esta cualidad es un complemento de las antenas de alta ganancia que suelen encontrarse en los radares que poseen una antena auxiliar de baja ganancia alimentando un receptor separado y con la misma ganancia que el receptor principal. En los dos canales se colocan amplificadores logarítmicos para que pueda deducirse la relación entre las potencias de señal de los dos canales empleando una red de sustracción. El objetivo de estos supresores es evitar la detección u otro tipo de procesamiento de los intensos impulsos de retorno del blanco y de los impulsos de interferencia recibidos a través de los lóbulos laterales de la antena del radar. Esto se logra utilizando la relación apropiada entre la ganancia de la antena auxiliar y la ganancia de la antena principal, junto con los valores adecuados del umbral de supresión para la relación entre las señales recibidas a través de las dos antenas. Esta técnica no protege contra la interferencia continua ya que si ésta fuera lo suficientemente fuerte como para inundar el receptor,

lo haría la mayor parte del tiempo, degradando drásticamente la efectividad del sistema. La supresión de los lóbulos laterales con el fin de eliminar la interferencia sólo es interesante en el caso de interferencia de ciclo activo pequeño. De utilizarse en radares de navegación, esta técnica restringiría aún más las interacciones de interés, limitándolas a aquellas en que se recibe interferencia a través del haz principal del radar de navegación.

4.1.4 Acoplamiento de lóbulo lateral a haz principal

Supóngase que un radar de radiolocalización introduce energía no deseada en un radar de radionavegación, creando la posibilidad de provocar falsas alarmas. Las falsas alarmas más problemáticas son las que se detectan en acimutes y distancias casi invariables en exploraciones sucesivas del haz de antena del radar de radionavegación, ya que podrían luego correlacionarse mediante observación manual o automáticamente y confundirse con un blanco válido. Una de las condiciones obligatorias para que eso suceda es que las falsas alarmas sean persistentes cuando el haz principal del radar de radionavegación orientado hacia un rumbo dado. Esto invita a centrar la atención en el caso de acoplamiento entre los lóbulos laterales del radar de radiolocalización y el lóbulo principal del radar de radionavegación. Ese acoplamiento puede ser muy fuerte en ocasiones, ya que los radares de radionavegación que funcionan en estas bandas se caracterizan por sus ganancias bastante elevadas. Es necesario que los radares de navegación marítima en esta banda tengan al menos 20 dB de reducción de los lóbulos laterales fuera del sector de 10° centrado en el haz principal, lo cual proporciona una reducción de la interferencia de al menos 20 dB durante el 97% del tiempo en cualquier dirección. (Como se muestra en la Fig. 1, la reducción de los lóbulos laterales suele ser por lo general aún mejor). Esta escasa frecuencia del acoplamiento estudiando no evitará por sí misma que las falsas alarmas se correlacionen para parecer blancos, ya que tiende a limitarlas a un solo sector estrecho. Pero la generación asíncrona de impulsos hará que las falsas alarmas aparezcan a distancias fundamentalmente aleatorias, cambiando frecuentemente y de manera no monótona de una exploración y otra, lo que reduce las probabilidades de que sean correlacionadas por un algoritmo de seguimiento automático o mediante observación visual.

4.2 Efectos logrados con procesadores

En el procesador de señales, los procesos que funcionan en la escala temporal de los impulsos individuales (denominados «de tiempo rápido», en el ámbito de los radares de apertura sintética) y los procesos que funcionan en la escala temporal de varios impulsos (denominados «de tiempo lento», en el ámbito de los radares de apertura sintética) pueden influir en el efecto que producen las señales no deseadas originadas por otros radares. Cualquier par de radares de diferente tipo, en especial si sirven para fines distintos como radiolocalización y radionavegación, utilizan casi siempre intervalos diferentes de repetición de los impulsos, especialmente en un momento dado. Esto ofrece la posibilidad de utilización de técnicas poderosas de reducción del efecto de la interferencia entre radares. Como esta reducción es una consecuencia de la falta de sincronismo entre los impulsos generados por el radar interferido y los recibidos por el radar interferente, se considera que existe aislamiento en el tiempo y no en el espacio o en la frecuencia radioeléctrica. Estas técnicas incluyen diversos métodos de procesamiento que se describen a continuación.

4.2.1 Procesos basados en impulsos individuales

4.2.1.1 Constante de tiempo rápida

Muchos radares de navegación marítima poseen la característica llamada constante de tiempo rápida (FTC, *fast time constant*), o diferenciación, que les permite reducir el efecto de sombra causado por los ecos parásitos procedentes de la precipitación. La técnica FTC se aplica en los circuitos de vídeo o de postdetección, pero precede a los procesos de «correlación impulso a impulso» o de integración no coherente. Por lo tanto, la técnica puede mejorar la efectividad de dichos procesos al limitar los impulsos no deseados a anchuras pequeñas y relaciones pequeñas de ciclo de trabajo a

medida que son sometidos a los procesos de correlación de impulso a impulso. Se acostumbra proporcionar algún tipo de FTC en los radares de navegación marítima que funcionan en torno a 10 GHz así como en los que funcionan en torno a 2 GHz. La FTC, junto con los amplificadores/detectores logarítmicos de frecuencia intermedia (FI) empleados en dichos radares facilitan la supresión de señales parásitas causadas por el mar. También tienen el efecto colateral de acortar impulsos más largos que podrían proceder de otros radares. De hecho, la FTC guarda una relación estrecha con la técnica de discriminación por anchura de los impulsos, empleada en algunos radares con el fin exclusivo de eliminar la interferencia activa.

4.2.1.2 Efectos desintonizados sobre el ciclo de trabajo

Independientemente de si se utiliza FTC, los impulsos largos originados en radares de radiolocalización que estén desintonizados con respecto a los radares de radionavegación provocarán respuestas en las secciones de FI de estos últimos, respuestas que son mucho más estrechas que los impulsos transmitidos por los radares de radiolocalización. Las transiciones al inicio y al final del impulso transmitido provocarán respuestas que se asemejan a la respuesta impulsiva del radar de radionavegación, con una anchura de sólo 1 ms o menor (dependiendo del modo de anchura del impulso del radar de navegación). En los tiempos entre las transiciones de los impulsos transmitidos (tiempos de subida, tiempos de bajada y algunas transiciones de subimpulsos) los niveles de respuesta serán bajos, similares a los que causaría una portadora desintonizada no modulada. De la misma forma en que sucede con FTC, este efecto puede disminuir considerablemente el ciclo de trabajo efectivo de los impulsos extraños al sistema, favoreciendo enormemente la efectividad de la «correlación de impulso a impulso» (que debe describirse) al disminuir la posibilidad de detección de blancos falsos.

4.2.2 Técnicas de integración de impulsos múltiples

Por lo general, estas técnicas incluyen tanto la «predetección» o integración coherente y la «postdetección» o integración no coherente. En este contexto, la «detección» se refiere únicamente al proceso que extrae la envolvente de la forma de onda y descarta su portadora, y no al proceso que compara el nivel de la señal con un umbral a fin de determinar la presencia del blanco. La integración coherente se utiliza normalmente en la puesta en práctica del procesamiento Doppler y para maximizar la sensibilidad general del radar. Los radares de aproximación de precisión pueden usar integración coherente. Al contrario de lo que sucede con la integración coherente, la integración no coherente trabaja únicamente con las magnitudes de los impulsos recibidos después de que un «detector de envolvente» haya descartado la información relativa a la fase. Independientemente de si realiza o no integración coherente, la mayor parte de los radares de navegación efectúan algún tipo de integración no coherente. Existe una variedad de técnicas de integración postdetección, que se estudian en el manual de radares Skolnik's Radar Handbook [Trunk, 1990].

4.2.2.1 Integración lineal

Además de la distinción entre integración coherente y no coherente, existe una diferenciación importante entre la integración lineal y la integración no lineal o cuantificada. La integración lineal pondera los trenes de impulsos recibidos no sólo según el número de dichos impulsos recibidos en células individuales de distancia/ángulo o de distancia/ángulo/Doppler, sino también según la magnitud de cada impulso. Como la integración lineal retiene la ponderación de la magnitud de cada impulso, cada impulso fuerte contribuye proporcionalmente más a la salida de la integración que un impulso débil, ello permite que los impulsos de interferencia aislados, si son lo suficientemente potentes, produzcan salidas relativamente fuertes. No obstante, la ponderación por el número de impulsos en una célula de distancia/ángulo/Doppler particular discrimina hasta cierto punto la interferencia impulsiva asíncrona, lo cual es especialmente interesante cuando los impulsos interferentes son relativamente débiles.

4.2.2.1 Características de reducción de los efectos de la interferencia de múltiples impulsos, particulares a los radares de apertura sintética

Además de la ventaja de ganancia de procesamiento en lo que respecta a los impulsos individuales, se cuenta con una ganancia de procesamiento adicional en los radares de apertura sintética debida a la integración del gran número de impulsos que forman la apertura sintética. Se incrementa la potencia de la señal deseada en un factor igual al cuadrado del número de impulsos, N , integrados durante el tiempo de la apertura sintética, que por lo general es muy largo. No obstante, como resultado de la interferencia impulsiva asíncrona, la ganancia de procesamiento del acimut será cercana a la unidad.

Normalmente, la ganancia de procesamiento total (distancia y acimut) de la interferencia impulsiva asíncrona de ciclo activo pequeño no será mayor a unos pocos dB. En cambio, el ruido continuo (o la interferencia similar al ruido) experimentará una ganancia de procesamiento de acimut igual a N .

4.2.2.2 Rechazo de la interferencia impulsiva asíncrona mediante integración binaria

Al contrario de lo que sucede con la integración lineal, la integración binaria (no lineal), que también se trata en la Recomendación UIT-R M.1372, descarta cantidades variables de información sobre la amplitud de los impulsos, en el caso extremo, y pondera cada impulso por igual. La integración no lineal tiende, por tanto, a igualar la ponderación de los impulsos individuales de eco del blanco válidos con los impulsos interferentes fuertes, discriminando así los impulsos interferentes asíncronos aislados, aún si estos son muy fuertes. La integración coherente normalmente es lineal, mientras que la integración no coherente puede ser lineal o no lineal.

La «integración binaria», «detección secuencial» o «detección de doble umbral» es un proceso no coherente y no lineal. En este caso, la «detección» se refiere a la salida de un comparador de umbral ubicado después de un «detector de envolvente». La detección secuencial combina las salidas del comparador de umbral o «primeras detecciones» en cada célula de distancia/ángulo durante los intervalos de repetición de impulsos (PRI, *pulse repetition intervals*) individuales o «barridos». A estos procesos con frecuencia se les conoce como integradores o correlacionadores, aunque rara vez sean verdaderos integradores o correlacionadores desde el punto de vista estrictamente matemático. Las detecciones individuales están limitadas o cuantificadas a cantidades binarias sencillas (cero o uno). Las diversas posibilidades de diseño permiten establecer distintos compromisos entre la detección de blancos o sensibilidad del seguimiento, la precisión en la estimación del acimut del blanco («centrado») y la supresión de detecciones provocadas por impulsos asíncronos. En algunos casos, el operador puede utilizar alguna latitud dada para llegar a un compromiso ajustando los parámetros operativos. La Recomendación UIT-R M.1372 contiene un resumen de las características del rechazo de impulsos asíncronos proporcionado por estos procesos.

Los integradores/detectores de doble umbral del tipo binario revisten gran interés ya que son especialmente potentes al discriminar las declaraciones de blanco causadas por impulsos asíncronos. Los integradores/detectores de doble umbral binarios se clasifican en dos tipos:

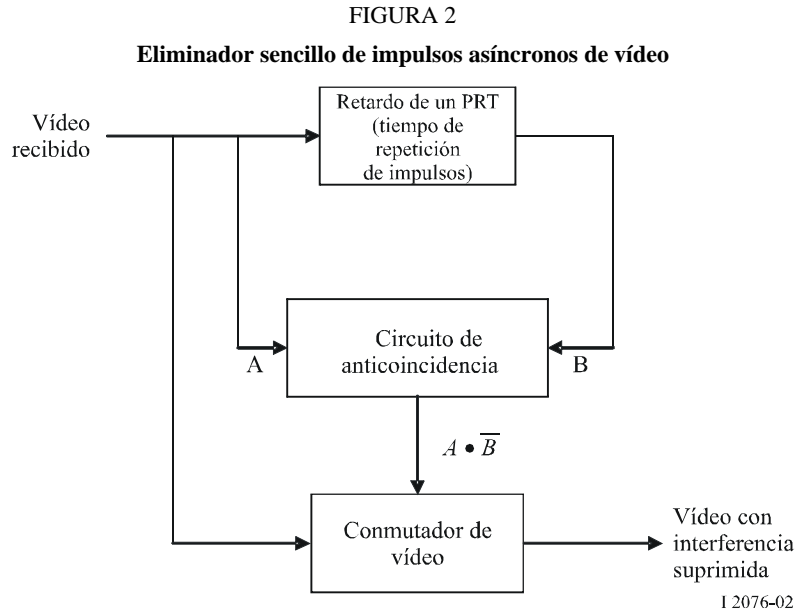
- tipo ventana deslizante, M de N ;
- tipo contador ascendente/descendente con reglas de cómputo arbitrarias. A veces se le denomina acumulador, integrador binario o integrador exponencial.

Ambas técnicas son a veces conocidas como procesos de Markov y se abordan en la Recomendación UIT-R M.1372.

4.2.3 Técnicas de eliminación y sustitución de impulsos asíncronos

Desde hace muchas décadas, incluso antes del advenimiento del procesamiento de señales digitales, se sabe que es posible eliminar impulsos asíncronos aislados. Las primeras versiones (así como las versiones más sencillas utilizadas hoy día) sólo funcionaban en amplitud, sin utilizar información

sobre la fase. La forma más simple consiste básicamente en un integrador binario 2 de 2, como el mostrado en la Fig. 2. Este tipo de circuito funciona eficazmente para vídeo «normal»; es decir, cuando no se cuenta con canceladores de indicadores de blancos móviles (MTI, *moving target indicator*).



Cuando se realiza procesamiento MTI, aparece el problema de que cada impulso asíncrono aislado genera varios impulsos síncronos, con la particularidad de que se generan más impulsos síncronos cuando se emplean canceladores recursivos o con realimentación que cuando sólo se emplean canceladores precompensados. Los integradores con realimentación pueden crear este mismo problema, aún si no se utiliza procesamiento MTI. Hay dos formas naturales para corregir esto:

- Eliminando los impulsos asíncronos antes de que la señal llegue al cancelador MTI.
- Utilizando únicamente canceladores e integradores precompensados o de respuesta de impulsos finita.

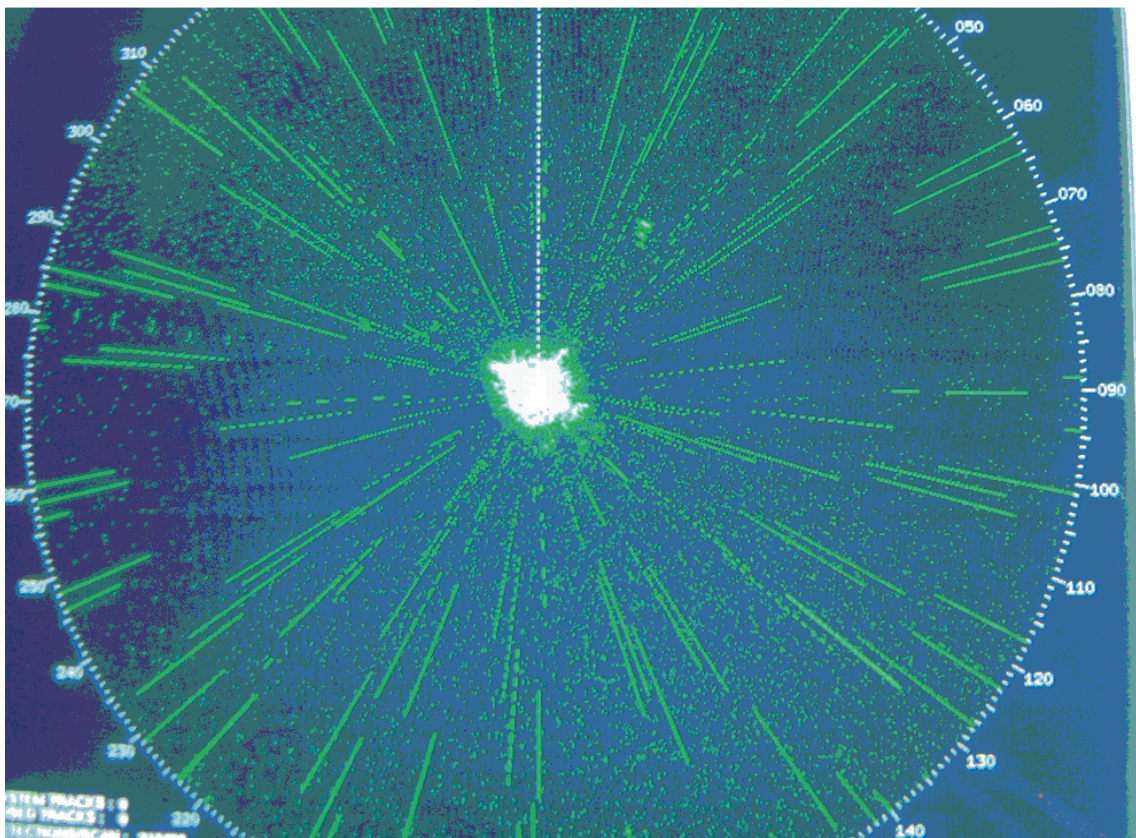
Los progresos experimentados en el procesamiento de señales digitales permiten a los radares identificar como interferencia las muestras de impulsos individuales debido a que son incoherentes, en magnitud (es decir, en potencia) o en ángulo de fase, con las muestras de impulsos recibidos que las preceden y/o que las siguen. Esto se puede lograr antes del procesamiento coherente como el filtrado Doppler o autocorrelación. Estos procesos utilizan una ventana deslizante de muestras consecutivas de un mismo intervalo, pero de PRI diferentes, para proporcionar una aproximación al valor que debe tener la muestra en el PRI sometido a prueba. La ventana puede abarcar del orden de 8 a 16 PRI, o podría abarcar sólo un par de PRI, siendo mejor la precisión en la determinación de la señal de retorno válida cuando se tienen ventanas de fondo mayores. Los procesos comparan los valores de la magnitud o de la magnitud al cuadrado ($I^2 + Q^2$), o los valores de las muestras individuales I y Q , para el PRI sometido a prueba (el PRI «actual») con sus homólogos en la ventana de fondo. De esta forma pueden actuar sobre los impulsos recibidos bien sea en la predetección (forma coherente) o en la postdetección (forma no coherente). Si las diferencias son lo suficientemente grandes, se sustituye el valor de la muestra actual por el valor calculado a partir de los valores de fondo. Como el procesamiento se realiza sobre las muestras de «vídeo coherente» I y Q , éste puede aplicarse independientemente de la banda de funcionamiento. Este tipo de técnica se utiliza en algunos radares tanto militares como civiles. Como estos procesos deben realizarse antes de la integración de múltiples impulsos, las estimaciones realizadas a partir de las muestras de

fondo, así como la muestra sometida a prueba, están sujetas a variaciones del ruido cuando se encuentran próximas al umbral de detectabilidad, por lo que los impulsos de interferencia débiles tienden a pasar desapercibidos. Por otra parte, la eficacia en la eliminación de la interferencia mejora progresivamente a medida que aumenta la relación interferencia/ruido, por lo que la eliminación de interferencias intensas es casi un hecho. Esta propiedad hace que dichos procesos sean un magnífico complemento a la supresión de la interferencia asíncrona débil procedente de la integración lineal de impulsos múltiples como el filtrado Doppler y la integración postdetección (no coherente).

Los radares de navegación marítima que pueden funcionar en la banda 9,3-9,5 GHz utilizan un proceso de postdetección similar al descrito. En cada una de las células cubiertas se establece una ventana deslizante que abarca sólo 3 PRI. Si uno de los impulsos de la ventana es desproporcionadamente intenso con respecto a los otros dos impulsos, se le sustituye por el promedio ponderado de los otros dos impulsos. El operador del radar puede activar o desactivar el proceso de rechazo de interferencia. Las pruebas realizadas sobre estos radares incluyeron la aplicación de un tren de impulsos de 10 ms con un ciclo de trabajo de 1%, sin activación para simular la modulación de la exploración de la antena. En la Fig. 3 se muestra cómo aparece el indicador de posición en el plano (PPI) del radar con la característica de rechazo de interferencia desactivada. Cada impulso interferente produjo una larga línea radial correspondiente a la anchura del impulso interferente de 10 ms.

FIGURA 3

Interferencia impulsiva en el PPI de un radar de navegación marítima con la característica de rechazo de interferencia desactivada

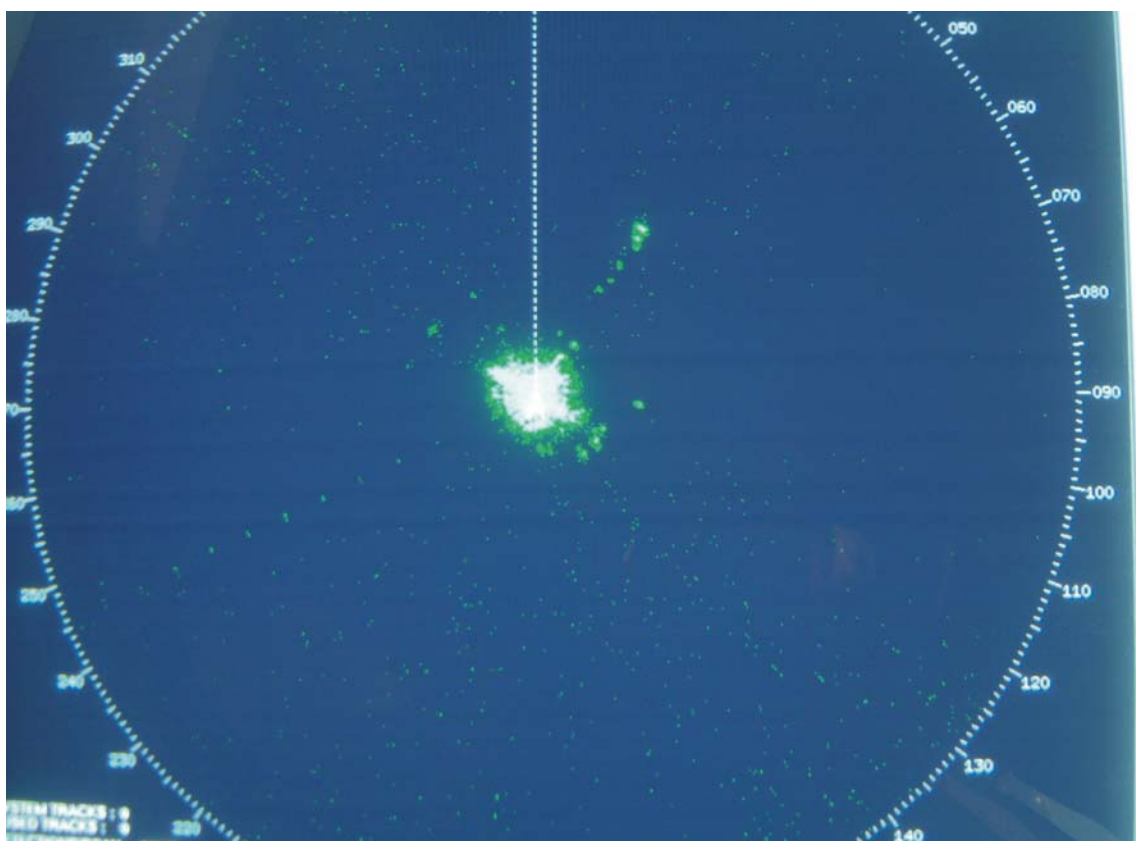


I 2076-03

En la Fig. 4 se muestra el PPI del radar una vez activada la característica de rechazo de interferencia. Desaparecen por completo los rastros de interferencia. Además de algunos puntos esparcidos, las únicas irregularidades pasajeras que aparecen en el PPI son el eco de las aglomeraciones fijas cercanas al sitio de prueba y la línea de ecos de blancos simulados aplicados deliberadamente para un rumbo de unos 280°.

FIGURA 4

Interferencia impulsiva en el PPI de un radar de navegación marítima con la característica de rechazo de interferencia activada



I 2076-04

4.2.4 Requisitos y prácticas respecto al rechazo de impulsos asíncronos

En una Resolución de la OMI se indica que los radares de navegación marítima deben proporcionar los medios para reducir apropiadamente la interferencia procedente de otros radares (además de los ecos no deseados provocados por diversos tipos de aglomeración) (Sección 5.3.2.1 de la Resolución de la MSC.192(79) de la OMI). Eso refleja exactamente las recomendaciones que figuran en las normas de la CEI tanto para radares SOLAS como para radares no pertenecientes al convenio SOLAS (CEI 60936 y CEI 62252). Si bien todos los factores mencionados contribuyen a reducir la interferencia, aunque sea únicamente como efecto colateral, los radares de navegación marítima normalmente proporcionan una característica dispuesta explícitamente para contrarrestar este problema. Estos radares realizan lo que se conoce como «correlación impulso a impulso», «correlación barrido a barrido» o «correlación línea a línea»². Esa característica normalmente utiliza

² En la Recomendación UIT-R M.1372, el proceso de ventana deslizante 2 de 2 se denomina «discriminador PRF».

una ventana deslizante que abarca N PRI o «barridos» consecutivos y aplica el criterio M de N para la segunda detección.

Un procesador de señales comercializado por una compañía líder de la industria para su uso en radares meteorológicos ubicados en tierra, algunos de los cuales funcionan en la banda 9,3-9,5 GHz, utiliza un proceso de predetección similar al proceso de postdetección empleado en los radares de navegación marítima. Para cada célula de distancia establece una ventana deslizante que abarca sólo tres PRI. Si se satisfacen ciertas condiciones relativas a la potencia de los tres impulsos, el valor del faser del impulso más reciente es sustituido por el que le antecede inmediatamente. El diseñador o el utilizador del radar puede elegir, de entre diversas condiciones diferentes, la que se debe cumplir para la sustitución del impulso, pero el principio fundamental es que la interferencia que aparezca, en una célula de distancia particular una sola vez para los tres PRI, pueda sustituirse por un valor razonable. Como el proceso sólo abarca tres PRI, éste podría sustituir la interferencia que tenga un ciclo de trabajo de hasta el $33^{1/3}\%$, pero eso sólo se podría lograr cuando exista una relación muy particular entre la PRF de los impulsos interferentes y la del radar afectado. Cuanto menor sea el ciclo de trabajo de la interferencia, menos particular y más robusta es la tolerancia de las relaciones entre las PRF de la fuente interferente y la víctima.

Es probable que los radares de detección de tormentas aerotransportados también incorporen procesos de rechazo de impulsos asíncronos. Una norma de la Comisión Radiotécnica de Comunicaciones Aeronáuticas (RTCA, *Radio Technical Commission for Aeronautics*) exige que esos radares eliminen la interferencia de radar a radar. La norma dice que la «transmisión de un radar de tipo idéntico, funcionando a bordo de una aeronave que vuela en un trayecto paralelo hacia una pista de aterrizaje adyacente o que sigue a la aeronave equipada con el radar a una distancia de hasta dos millas náuticas, no deberá ocasionar falsas alertas, detecciones fallidas ni otra interferencia observable»³.

4.3 Efectos sobre la ganancia no lineales y variables con el tiempo

4.3.1 Limitación

La limitación puede realizarse en diversos puntos del receptor/procesador. Puede producirse de diversas formas y podría ser deliberada o involuntaria. La limitación involuntaria aparece cuando el circuito de RF o de FI del receptor es excitado más allá de su gama lineal. En los radares que utilizan procesamiento de señales digitales, el circuito incluye el conversor A/D.

Independientemente del equipo, la limitación tiende claramente a igualar las amplitudes de los impulsos no deseados y las de los impulsos de eco válidos cuando al menos uno de ellos es intenso. Esto hace que en los demás procesos mencionados mejore la capacidad de discriminación de los impulsos asíncronos que podrían recibirse de los radares de radiolocalización.

A veces se incluyen limitadores en la cadena receptor/procesador para tratar de evitar detecciones ocasionadas por ecos parásitos intensos. Esto se hacía anteriormente cuando se utilizaban canceladores de indicador de blanco móvil (MTI) sin aplicar procesos efectivos adecuados de tasa de alarmas falsas constante (CFAR, *constant false alarm rate*) o mapas de ecos parásitos, con la intención de que el operador ajustara el nivel del límite para evitar la mayoría de falsas alarmas debidas a residuos de dichos ecos. El empleo de la limitación a este efecto tiende a disminuir a medida que se dispone cada vez más de conversores A/D de alta gama dinámica y de procesamiento digital.

³ Documento N° RTCA/DO-220, Minimum operational performance standards for airborne weather radar with forward-looking windshear capability, 21 de septiembre de 1993, RTCA, Inc.

Como se indica anteriormente, los procesos en que se retiene la amplitud tienden a maximizar la sensibilidad de detección, pero aquellos en los que las amplitudes se limitan o cuantifican tienden a sufrir pérdidas de sensibilidad variables, a la vez que proporcionan una fuerte discriminación contra los impulsos asíncronos. Cuando se cuenta con un limitador, el operador puede a veces hacer variar las condiciones, para pasar de una situación en la que se optimiza la sensibilidad a otra en la que se proteja contra falsas alarmas causadas por la interferencia, disminuyendo el nivel del límite; es decir, aplicando una limitación más estricta. Esto es especialmente importante cuando se utiliza un integrador con realimentación, ya que los procesos de realimentación hacen que aparezcan impulsos síncronos a partir de impulsos asíncronos y, por lo tanto, tienden a no responder satisfactoriamente ante impulsos asíncronos.

La limitación estricta aplicada en una amplia anchura de banda (ajuste de Dickie) antes de realizar el filtrado para obtener una menor anchura de banda de filtro adaptado es una técnica que se utilizó en el pasado como una forma económica de CFAR. También es útil para atenuar el efecto de los impulsos de interferencia estrechos y a veces se emplea para contrarrestar contramedidas electrónicas contra interferencia de ruido por barrido en FM. No obstante, de no ser opcional, su uso es arriesgado ya que permite que, aun estando desintonizado respecto a la señal deseada, las señales interferentes intensas y moderadamente intensas puedan causar supresión de señales pequeñas. Puede considerarse que la integración binaria, tratada en el § 4.2.2.2, es una forma de limitación, pero como se aplica muy adelante en el circuito del receptor/procesador, no provoca la supresión de las señales pequeñas.

4.3.2 Amplificadores logarítmicos

Desde mediados de los 70 casi todos los radares de navegación marítima vienen utilizando amplificadores logarítmicos. Los amplificadores logarítmicos tienen un efecto similar al de la limitación estricta, aunque no tan completo, reduciendo el efecto de la alta amplitud de los impulsos individuales como factores de degradación de la calidad de funcionamiento. Sin duda alguna, estos amplificadores disminuyen la probabilidad de que los impulsos de interferencia intensos saturen el receptor. Además, estos amplificadores son lineales o casi lineales a bajos niveles de señal, pero a fin de lograr la mayor efectividad cuando se utilizan junto con acoplamiento de corriente alterna (o FTC; véase el § 4.2.1.1) para reducir los efectos de los ecos parásitos causados por el mar, la transición entre la región lineal y la región logarítmica debe producirse a unos 20 dB por debajo del nivel medio del ruido [Croney, 1956].

4.3.3 Control del tiempo de la sensibilidad (STC)

El control del tiempo de la sensibilidad (STC, *sensitivity time control*) es un tipo de ganancia variable con el tiempo. Se trata de una forma de desensibilización deliberada que varía en cada PRI o «barrido». El receptor o procesador se desensibiliza únicamente en los instantes correspondientes a ecos originados en blancos cercanos, ya que esos blancos producen ecos tan intensos que para detectarlos no es necesario utilizar toda la sensibilidad del receptor. El STC tiene el efecto de que, a distancias inferiores a un valor seleccionado, el umbral de detección del eco del radar, respecto al puerto de la antena, varía a un ritmo que compensa aproximadamente la relación de cuarta potencia inversa entre la potencia del eco y la distancia del blanco, para una sección transversal dada del radar blanco. (Hoy en día, algunos receptores producen normalmente salidas que son proporcionales al logaritmo de la amplitud o de la potencia de la señal recibida. El circuito del STC, instalado en la sección de vídeo, pondera esas respuestas con una función de ganancia deducida a partir de una caída exponencial). El STC ayuda a eliminar el eco causado por aglomeraciones, que normalmente es más intenso para las aglomeraciones cercanas que para las lejanas, y que de lo contrario podría sobrepasar la gama dinámica lineal del receptor/procesador. El STC también tiende a eliminar las detecciones debidas a «ángeles» (por lo general causadas por reflejos de pájaros) a corta distancia.

Evidentemente, el STC también ayuda a disminuir el número y la amplitud de las detecciones que podrían provocar los impulsos de radares de radiolocalización, hasta el punto de que las detecciones aparecerían como blancos falsos a corta distancia. En muchas situaciones, es más importante eliminar los blancos falsos cercanos que los blancos falsos que aparecen a mayor distancia, ya que normalmente se requiere una acción más inmediata ante los blancos cercanos que ante los lejanos, para evitar colisiones. Los radares de navegación marítima utilizan el STC, instalado en el circuito de vídeo, como un medio para suprimir los ecos parásitos causados por el mar. Los radares de control de tráfico aéreo que funcionan en esta banda también han contado con la capacidad STC.

4.4 Procesamiento de CFAR

Los radares de vigilancia de blancos discretos necesitan algún mecanismo para mantener la tasa de detecciones dentro de límites razonables. Como la mayoría de detecciones por lo general son provocadas por ruido o por eco debido a aglomeraciones, convirtiéndose por tanto en falsas alarmas, a dichos mecanismos se les conoce como procesos de CFAR. En los sistemas más sencillos, podrían estar representados por el control manual de ganancia o del umbral de detección. Sin embargo, la regulación es normalmente automática. Esto puede lograrse bien de una forma relativamente global, es decir, afectando sectores angulares amplios y una fracción grande de todas las distancias; o bien fijando localmente el umbral de forma adaptable. En la primera categoría, las técnicas podrían incluir el control de ganancia automático, que calcula el promedio para todas o la mayor parte de las distancias, el ajuste de Dickie, STC y/o la combinación de un amplificador logarítmico con FTC o diferenciación de impulsos. Las formas locales adaptables de CFAR incluyen la creación de un mapa de aglomeraciones y en especial circuitos de media y umbral locales. El mapa de aglomeraciones consiste en una matriz de niveles de señal, promediados para muchas exploraciones de la antena y calculados para cada una de las muchas pequeñas células de distancia/acimut. Los circuitos de media y umbral locales, o circuitos para el cálculo de promedios de células de CFAR, proporcionan un umbral de detección que se adapta al nivel de la aglomeración (y de la interferencia) en las proximidades inmediatas de cada célula de distancia/Doppler/acimut en que se busca el blanco. Los procesos CFAR de media y umbral locales funcionan construyendo una ventana deslizante que se superpone rebasando la distancia (para cada canal Doppler, en el caso de radares Doppler) en cada PRI. Cada una de estas ventanas cruza sobre la célula de distancia para la que se ha de tomar la decisión, abarcando entre 10 y 30 células de distancia adyacentes (por lo general la mitad de ellas a distancia menor y la otra mitad a distancia mayor). Normalmente se promedian las amplitudes de las señales en esas células adyacentes y se multiplica el valor medio por un factor como 4 u 8 a fin de establecer el umbral de detección local. No obstante, a menudo se utilizan muchas variantes de ese diseño básico. Por ejemplo, podría hallarse el promedio para las células anteriores a la célula sometida a prueba, separadamente del de las células posteriores a la sometida a prueba y utilizarse el mayor de los dos valores medios para fijar el umbral.

En los procesos CFAR de cálculo de promedios de las células, se suele excluir del cálculo las células individuales que posean las señales más intensas respecto a las células de distancia adyacentes. Esto posiblemente se hace en parte para evitar que los residuos de eco originado en dispersores de punto de las aglomeraciones hagan aumentar innecesariamente el umbral de detección. Sin embargo, esto también evita que impulsos asíncronos aislados afecten el valor del umbral y dan lugar a niveles de umbral inadecuadamente elevados. Esto no contribuye a la reducción de blancos falsos provocados por impulsos no deseados, pero disminuye la frecuencia con la que los impulsos no deseados desensibilizan el radar interferido.

4.5 Efectos logrados mediante software (postprocesamiento)

La agrupación en distancia/acimut de detecciones de blancos también puede examinarse automáticamente mediante la aplicación de diversos algoritmos que permiten decidir si la agrupación de detecciones dada representa o no un blanco válido. (Estos procesos también discriminan los «ángeles», que son casi siempre reflexiones procedentes de pájaros).

Todo procesamiento tipo «seguimiento durante exploración», que asocia anuncios de blanco originados en exploraciones consecutivas del haz de antena y calcula las posiciones y velocidades vectoriales de los blancos, también tiene la capacidad de descartar blancos falsos. Este tipo de postprocesamiento está normalizado en radares de control de tráfico aéreo, y muchos radares de navegación marítima también poseen la característica de correlación exploración a exploración, para eliminar los ecos parásitos causados por el mar. Tiende a asociarse esta característica con el empleo de pantallas de barrido de puntos en contraposición a las pantallas tradicionales de barrido radial. La ventaja inicial de las pantallas de barrido de puntos radicaba en que su brillo era mucho mayor que el de las pantallas de barrido radial, ya que, con cada exploración de la antena, las pantallas se reescriben muchas veces, en vez de sólo una. Su uso implica que los datos sobre las detecciones de blancos de todas las células de distancia-acimut deben almacenarse en memoria, para al menos una exploración completa de la antena, antes de presentarse en pantalla. Los grandes adelantos de años recientes relativos a los circuitos de memoria digital han hecho que las pantallas de barrido de puntos sean ahora asequibles económicamente. La capacidad de memoria, también permite almacenar los datos de eco de radar correspondientes a varias exploraciones, para todas las detecciones de blanco individuales, y, para cada célula de distancia-acimut, comparar los datos de las detecciones correspondientes a una exploración con los correspondientes a una o dos exploraciones precedentes, antes de mostrarlos en pantalla. Si los ecos se clasifican de forma binaria (presente o ausente) o en términos de unos pocos niveles, se pueden aplicar reglas para determinar el nivel de brillo adecuado que se debe utilizar para cada píxel de distancia-acimut de la pantalla, dependiendo de la combinación de los niveles de los ecos de exploraciones diferentes. Esta característica hará que sean más brillantes los píxeles para los que los ecos perduran durante dos o más barridos. Lo que es más importante a efectos de compatibilidad entre radares de radiolocalización y radares de radionavegación, es que esta característica atenuará o suprimirá los píxeles en los que aparezca un posible eco en una exploración pero no en la siguiente o siguientes dos exploraciones. Aún en los radares de navegación que carecen de esta característica, el operador puede deducir si las respuestas en pantalla representan ecos de blanco válidos o no, basándose en la observación visual de la variabilidad en la iluminación del píxel. Cuando llega interferencia de otro radar a través del acoplamiento de lóbulo lateral a haz principal, se pueden producir persistentemente detecciones en un mismo rumbo. No obstante, la generación de impulsos asíncronos en los dos radares tenderá a evitar que esas detecciones ocurran en la misma célula de distancia. Por tanto, con el procesamiento de múltiples exploraciones normalmente se evita que esas detecciones aparezcan en pantalla.

4.6 Efectos logrados mediante el espectro

Entre los fenómenos relacionados con la frecuencia, la sensibilidad y la supresión de respuestas parásitas del receptor son factores que influyen en el rechazo de interferencia entre radares así como en otras interacciones de la interferencia. Cabe esperar que la sensibilidad del receptor atenúe en al menos 60 dB las componentes espectrales que se encuentren lo suficientemente alejadas de la banda de paso del receptor interferido. Sólo se puede sacar el máximo provecho de la supresión de la banda de rechazo del radar de radionavegación si las componentes no deseadas de los espectros de emisión de los radares de radiolocalización y de detección a bordo de vehículos espaciales se atenúan en la misma medida. En las bandas 9 000-9 200 MHz y 9 300-9 500 MHz, la mayoría de los radares de radiolocalización utilizarían transmisores que no fueran dispositivos de campo

cruzado para que las componentes de ruido de las emisiones no deseadas fueran relativamente pequeñas.

De la misma forma, todos los radares a bordo de vehículos espaciales destinados a funcionar parcialmente en las bandas 9 300-9 500 MHz o 9 800-10 000 MHz , también usarían dispositivos de transmisión que no fueran de campo cruzado. Los niveles de las emisiones no deseadas originadas por los radares de radiolocalización o los radares a bordo de vehículos espaciales, en las bandas en cuestión, estarían determinadas más por las rampas de subida-bajada y de transición de los circuitos, con la correspondiente modulación angular, que por el ruido del dispositivo. En la Recomendación UIT-R M.1314 – Reducción de las emisiones no deseadas de los sistemas de radar que funcionan por encima de 400 MHz, se describe la eficacia espectral de varios dispositivos de salida del transmisor del radar.

Adicionalmente, la intermodulación de dos señales tiende a ser menos importante con respecto a las interacciones entre radares que con respecto a la interferencia entre sistemas de comunicaciones, ya que las transmisiones de los radares suelen tener ciclos de trabajo de forma de onda relativamente bajos. Las coincidencias temporales entre impulsos procedentes de dos radares suelen ser raras ya que es poco probable que alguno de los radares emita un impulso que llegue a un radar interferido en el mismo instante en que llega un impulso del otro radar.

Algunos radares de radiolocalización transmiten impulsos largos con ciclos de trabajo que son pequeños si se les compara a los de los sistemas de comunicaciones, pero que son relativamente grandes respecto a los de los radares de radionavegación. Sin embargo, los impulsos más largos normalmente se modulan con formas de onda de frecuencia de barrido, o barrido en frecuencia, a fin de soportar compresión de impulsos en el receptor del radar de radiolocalización; y el barrido de frecuencias en estos impulsos largos es mucho más ancho que las bandas de paso de los radares de radionavegación. Aun si el barrido de frecuencias abarcara completamente la banda de paso del radar de radionavegación, prevalecería fundamentalmente el rechazo dependiente de la frecuencia a medida que la frecuencia instantánea barre los puntos anteriores y posteriores a la banda de paso. Este efecto se comprobó empíricamente en un radar de navegación marítima funcionando en la banda 9,3-9,5 GHz y los resultados son objeto de un informe por separado. Este debilitamiento de la energía sintonizada puede analizarse desde varias perspectivas. Es evidente que la densidad espectral de potencia media disminuye con la dispersión de frecuencias. Una forma más práctica de analizar el efecto de debilitamiento consiste en reconocer que la anchura efectiva del impulso, es decir, la anchura de los impulsos que emite la sección de FI del radar de radionavegación, es a menudo mucho menor que la anchura del impulso transmitido por el radar de radiolocalización. Esa reducción de la anchura del impulso puede garantizarse con un diseño adecuado de los radares de radiolocalización y de los SETS/SIE. De esta forma, el truncamiento en frecuencia realizado por el receptor del sistema de radionavegación se traduce en truncamiento en el tiempo. Si la frecuencia del barrido en frecuencia es superior al cuadrado de la anchura de la banda de paso en FI del radar interferido, la anchura efectiva del impulso (a la salida del amplificador de FI) viene determinada por la duración de su respuesta al impulso, pero la amplitud del impulso recibido se atenúa con respecto a la amplitud del impulso capturado por la antena del radar interferido. En ese caso, la potencia de cresta de la respuesta se vuelve inversamente proporcional a la frecuencia de barrido. Esto, evidentemente, también contribuye a la atenuación de la interferencia.

En muchos radares, en especial en los radares de radionavegación aeronáutica, se utilizan diversidad de frecuencia y agilidad de frecuencia. La agilidad de frecuencia disminuye el riesgo de que emisiones originadas en un radar se superpongan permanentemente en la banda de paso de otro radar.

5 Conclusiones

La compatibilidad mutua entre los radares de radiolocalización y los radares de radionavegación se ve favorecida ante todo por la exploración de sus haces de antena, de forma que pocas veces se recibe energía no deseada mediante acoplamiento de haz principal a lóbulo lateral y apenas mediante acoplamiento de haz principal a haz principal.

Más importante aún es que las diferencias entre las frecuencias de exploración de los radares de radiolocalización y los radares de radionavegación evitan que se produzcan interferencias recurrentes a través del haz principal del radar interferente, en un mismo rumbo interferido, disminuyendo así el riesgo de correlación de las falsas alarmas causadas por interferencia y que pueden aparecer de una exploración a otra. Se logra reducir más la interferencia haciendo que la forma de onda de los dos tipos de radar sea diferente y rechazando los impulsos no deseados correspondientes mediante filtrado y procesamiento de señales en el receptor. En algunos radares, el procesamiento de señales incluye el procesamiento coherente (predetección) y el procesamiento no coherente (postdetección). En otros radares de navegación, casi no existe o no existe en modo alguno procesamiento coherente, pero el procesamiento no coherente puede ser muy efectivo para mejorar la compatibilidad entre radares de radiolocalización y de radionavegación.

Muy pocos, o ninguno, de estos mecanismos se aplica a la interferencia causada a los radares de cualquier tipo, por transmisores de comunicaciones de onda continua que no utilizan exploración y que emplean formas de onda similares al ruido.

Referencias

- CRONEY, J. [abril de 1956] Clutter on radar displays. *Wireless Engineer*, Vol. 33, p. 83-96.
- MAISEL, L. [marzo de 1968] Performance of sidelobe blanking systems. *IEEE Trans. on Aerospace and Electron. Systems*, Vol. AES-4, 2, p. 174-180.
- SKOLNIK, M.I. (Ed.) [1990] *Radar Handbook*, McGraw-Hill.
- TRUNK, G.V. [1990] *Automatic detection, tracking and sensor integration*, Capítulo 8 de M.I/ Skolnik (Ed.) *Radar Handbook*, segunda edición, McGraw-Hill.
-