

APENDICE

LOS SENSORES

PARTE I

LOS SENSORES Y EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

EL USO DEL ESPECTRO

Existe toda una parafernalia de sensores, desde los más complejos abordo de satélites, hasta los anteojos de luz residual del infante; desde los que tienen un alcance de 400 km hasta los que sólo llegan a los 400 metros.

Todos estos sensores son los que brindan la información para poder tomar las decisiones correctas; por lo tanto son: los sensores a degradar cuando son los del enemigo; son los sensores a proteger cuando son los nuestros; y son estos mismos sensores los que nos permiten obtener la información que necesitamos para realizar la degradación de los sensores del enemigo.

Aunque parece un párrafo escrito para confundir, es la realidad, realidad que nos permite (también a nuestro enemigo), degradar al oponente al accionar sobre cualquiera de estos sensores.

Cada sensor es un elemento del entramado que conforma la red de C^2 , y que presenta mayor o menor vulnerabilidad, pero con la particularidad que el daño que se les puede hacer normalmente no tiene un efecto local, sino que repercute en toda la red.

Una simple observación de los sensores permite apreciar que cada uno tiene sus características particulares, y está diseñado para operar dentro de determinados parámetros, lo que ha veces los hace completamente disímiles.

Esa gran diversidad de características que poseen hace difícil su análisis y comprensión, por eso a continuación intentaremos agruparlos o clasificarlos de forma que sea posible entender sus capacidades y vulnerabilidades.

En el gráfico N° 11 (al final del Apéndice) se ha hecho una primera agrupación general, tratando de mostrarlos en su totalidad.

Si utilizamos este gráfico como referencia, podemos observar que la gran mayoría utiliza el eem (espectro electromagnético) para operar.

Es por este motivo, sumado a la degradación/protección de las comunicaciones, que también hacen uso de este espectro, que a la INFOWf se la considera una evolución de la EWf clásica.

De los sensores que operan fuera de ese espectro, los acústicos, sísmicos y magnéticos, sensan características particulares en una determinada área, lo que hace que sus alcances sean reducidos, mensurables en metros, por lo que resultan

útiles sólo puntualmente.

Los que sensan la presencia de agentes QBN también suelen ser puntuales, y sólo cubren una distancia importante cuando se los usa para captar los agentes arrastrados por los vientos.

Si observamos los encuadrados en el eem, podemos distinguir dos grandes agrupaciones: **pasivos y activos**. Esta clasificación está dada porque los últimos, los activos, necesitan recurrir a un emisor propio para captar el reflejo (eco) de su emisión. Estos son los radares y el láser.

Los pasivos en cambio, utilizan como señal a detectar la emisión propia de los objetos (los blancos), o, en el rango de las frecuencias ópticas (fotografía, video o TV) y parte del IR (cercano), el reflejo de una fuente de luz, natural o artificial.

Para analizarlos hay diversas posibles formas de agruparlos, algunas de ellas pueden ser:

- Por la parte del eem en que operan.
- Por el tipo de información que brindan.
- Por el blanco que buscan.
- Por las plataformas que los portan.

En el gráfico N° 12 (al final del Apéndice) se muestran las bandas de frecuencias comúnmente llamadas "de radiofrecuencia" (hasta 100 GHz). Esta es la parte que a través de los años, y por diversos motivos, ha sido subdividida en formas distintas y con varias designaciones, lo que ha dado por resultado una pequeña anarquía que a veces lleva a confusión, sea que se hable de equipos civiles, militares, o de guerra electrónica.

En el gráfico se han tratado de mostrar todas las alternativas.

Debido a las características de operación y a ciertas limitaciones en cuanto a tecnologías que no estaban disponibles hasta hace un par de décadas, durante mucho tiempo se construyeron equipos que llegaban hasta los 18 GHz, en la parte baja del espectro, para luego saltar a las frecuencias IR y ópticas.

Por eso aún hoy la mayoría de los equipos operan en ambos extremos del espectro, aún cuando los nuevos desarrollos buscaron aquellas bandas de frecuencias más altas que mejor propagan, por ejemplo entre 30 y 40 GHz, o entre los 90 y 100 GHz.

Aunque siempre se hace referencia al espectro en función de las bandas de frecuencia, en la parte alta (IR, ópticas, etc.) (ver el gráfico N° 13 al final del Apéndice) se hizo costumbre, debido a las magnitudes involucradas, a referirlas en función de las longitudes de onda.

Para una conversión simple y práctica de estas unidades, resulta útil recordar que la frecuencia (dada en GigaHertz – GHz) es igual a 30 sobre la longitud de onda λ (dada en centímetros).

Haciendo una clasificación de esta parte del espectro, podemos comenzar por la banda de frecuencias de 90 a 100 GHz, a la que se hace referencia en forma

indistinta, sea por su frecuencia o por su longitud de onda: **milimétrica**. Aún cuando ésta en realidad cubre una mayor parte del espectro, de 30 a 300 GHz, por ahora la mayoría de los emisores están concentrados en esa "ventana" de 90 a 100 GHz.

Los 300 GHz corresponden a un λ de 1 milímetro (=1000 μ =1000 micrómetros); a partir de aquí comienza el espectro IR, que abarca hasta los 0,76 μ .

Al IR se lo subdivide por referencia a su proximidad al espectro óptico, denominándolo:

- **IR cercano:** abarcando desde los 0,76 μ (límite con el óptico) hasta los 1,5 μ (algunos lo hacen llegar hasta los 3 μ).
- **IR medio:** desde 1,5 μ a 7 μ (o desde 3 a 6 μ según otros).
- **IR lejano:** desde 7 μ a 1000 μ (límite con las longitudes de onda milimétricas), o para otros: de 6 a 15 μ el IR lejano, y de 15 a 1000 μ el IR muy lejano o IR extremo.

La parte **óptica** del espectro comprende desde 0,39 μ a 0,76 μ , y más allá se encuentran las longitudes de onda **UV** (ultravioleta), de 0,01 μ a 0,39 μ , y los rayos X y gamma.

TRANSMITANCIA, REFLEXION, EMISIVIDAD

Siguiendo con el análisis de las frecuencias superiores del espectro, observamos ciertas particularidades.

La energía emitida en el espectro visible tiene su origen en fuentes naturales, como el sol, las estrellas, o un dispositivo de iluminación, y es reflejada por los diferentes objetos del ambiente.

Esta capacidad de reflexión de la energía del sol se extiende al UV cercano y al IR cercano.

Esta parte del IR que es por reflejo de la radiación del sol, tiene la particularidad que puede identificar agua u otros contenidos químicos, lo que permite por ejemplo determinar el estado de la vegetación, o predecir el producido de las cosechas; y para nuestro caso en particular, puede por ejemplo penetrar el enmascaramiento típico para la detección visual, o detectar zonas húmedas que no permiten el paso de vehículos.

Más allá de los 3,5 μ la radiación térmica emitida supera a la reflejada por los objetos; emana directamente de ellos en virtud de su temperatura absoluta (en grados Kelvin) y su coeficiente de emisividad.

Debemos aclarar que lo que se detecta es la emisión térmica, no la

temperatura o calor, aunque están relacionados.

Esta emisividad se basa en la diferente capacidad que tienen los distintos materiales para retener el calor absorbido, por eso permite conocer la existencia de determinados minerales en el suelo, permite identificar objetos enterrados y detectar estructuras ocultas, etc.

Un ejemplo de la guerra del Golfo: los iraquíes habían enterrado sus tanques en la arena; por la noche, ambos, la arena y los tanques se enfriaban pero con distinta rapidez, el resultado: los tanques eran fácilmente detectables de noche usando sensores IR, lo que hacía sencillos su ataque y destrucción.

En las longitudes de onda a partir de 1000μ (1 mm) o milimétricas, las señales a captar son el reflejo de una emisión artificial, por lo que necesitan un emisor radar; salvo un caso particular que veremos más adelante al analizar el radiómetro milimétrico.

En el otro extremo, los detectores UV funcionan en las longitudes de onda de 250 a 300 nanómetros, banda en la cual el sol no tiene casi radiación y que es conocida como "solar blind" (ciega a la radiación solar).

La propagación de estas emisiones a través de la atmósfera presenta ciertas particularidades debido sobre todo a las moléculas en suspensión de diversos componentes, cuyas dimensiones físicas coinciden con determinados largos de onda, haciendo que la emisión sea absorbida o dispersada, (reflejada o refractada en distintas direcciones).

Esto hace que la atmósfera no sea un medio transparente a las radiaciones, con la particularidad que las absorciones y dispersiones no son iguales en las distintas frecuencias del espectro.

Así, en la parte visible, la energía es absorbida por los componentes moleculares, y la dispersión es producida por las partículas de humedad, niebla o moléculas de oxígeno, siendo particularmente intensa entre los $0,3$ y $0,7 \mu$.

En las frecuencias IR, la absorción se produce por las moléculas de vapor de agua y por el anhídrido carbónico (CO_2). La dispersión es producida sobre todo por las moléculas de niebla en suspensión, pero como sus dimensiones raramente son superiores a los $0,5 \mu$; no tienen casi efecto en las frecuencias de 3μ o más.

Esta es la razón por la que los primeros TV que se utilizaban, y que cubrían la banda de $0,3$ a $0,6 \mu$, eran afectados por la dispersión producida por la humedad.

Cuando el vapor húmedo se condensa, el diámetro de las partículas aumenta, pudiendo llegar hasta los 80μ , pero con una distribución Gaussiana con centro en los 5 a 15μ , afectando al IR en la ventana de 8 a 12μ

En forma práctica podemos decir que las radiaciones visibles son afectadas por bruma, niebla débil o llovizna; mientras que las radiaciones IR son afectadas por niebla espesa (1 a 10μ) que contiene partículas líquidas grandes, lluvia y gran humedad, lo que además tiende a uniformar la temperatura de los objetos

que están en el mismo ambiente, atenuando la diferencia de emisión entre un blanco y su entorno, que es lo que detecta por ejemplo un FLIR.

Al IR también lo afecta la propia radiación IR de la atmósfera, especialmente cuando ésta queda encerrada entre la tierra y una capa de nubes y se calienta, irradiando entre 5 y 7 μ .

Esto hace que se creen "ventanas" en las cuales la transmitancia (posibilidad de propagación) sea aceptable o adecuada.

Los estudios experimentales han determinado que, en el caso del IR por ejemplo, esas ventanas se encuentran en 1,5 a 1,8 μ ; 2 a 2,5 μ ; 3,5 a 4,2 μ ; 4,5 a 4,8 μ ; y 8,5 a 12,5 μ .

Pero esto no quiere decir que no haya emisión en el resto de las longitudes de onda. Por eso se debe distinguir, ya que muchas veces se presta a confusión, entre emisividad y transmitancia.

La **emisividad** es una característica de todos los **cuerpos** (objetos), que hace que emitan radiaciones IR en determinadas frecuencias según sea su composición, su capa exterior si el cuerpo es opaco, y su temperatura absoluta.

La **transmitancia** en cambio depende del **medio** en el que se propaga la emisión, en nuestro caso: la atmósfera. La composición de este medio hará que tenga mayor o menor transmitancia, y esto hará a su vez que las emisiones tengan mayor o menor alcance (distancia) según la frecuencia en que son emitidas.

Así como hablamos de las moléculas de agua y CO₂, todo otro tipo de moléculas en suspensión (por ejemplo humo) actuarán sobre la transmitancia de la atmósfera.

El elemento de la naturaleza que más actúa es el agua en sus diferentes composiciones de agrupamientos moleculares, desde la bruma y rocío, hasta las gotas de lluvia, nieve o hielo.

Este efecto no sólo se produce en las frecuencias IR, sino que actúa en todo el eem, haciéndose sentir más en donde las dimensiones físicas coinciden con las longitudes de onda; por ejemplo, las gotas de lluvia afectan notablemente a los radares milimétricos, porque su dimensión es de algunos milímetros, que es la longitud de onda de los radares.

Cuando consideramos a los sensores, estas características de transmitancia hacen que algunos sean más eficientes que otros en determinadas condiciones climáticas, y asimismo, un determinado sensor no siempre rendirá lo mismo, pues depende notablemente de las características de propagación imperantes.

Volviendo al IR, las ventanas que antes vimos han hecho que desde el punto de vista empleo, se adopten dos ventanas:

- La de longitud de onda media (**mid wave window**) de 3 a 5 μ , que es la menos afectada por la humedad y polución; es sensible a objetos "calientes" como el fogonazo de un arma o la cola de gases de un misil.

- La de longitud de onda larga (**long wave window**) de 8 a 12 μ , que está limitada por la lluvia y humedad, pero es la más sensible a pequeñas diferencias de temperatura entre el blanco y su entorno.

El IR cercano por su parte, en donde lo que se capta es la energía solar reflejada a igual que en el espectro óptico, tiene la ventaja sobre éste que atraviesa niebla ligera, nubes de polvo, cortinas de humo, y la bruma de baja humedad. Asimismo puede operar de noche sin ninguna degradación.

En cuanto al radar milimétrico, el más próximo a estas frecuencias, puede penetrar el mal tiempo, el follaje y el suelo seco, y los factores que afectan su reflectividad son la conductividad eléctrica de los materiales, y la forma y tamaño en relación a la longitud de onda de la señal radar.

Respecto a los equipos láser, éstos operan en las bandas de frecuencias ópticas e IR, y por lo tanto están sujetos a las condiciones y características de estas bandas.

Los sistemas que operan en la parte baja del espectro, los distintos tipos de radares, las comunicaciones, y los sensores de guerra electrónica, también son afectados en su propagación, pero en una forma diversa, la que veremos al tratarlos más adelante.

LOS TIPOS DE SENSORES POR BANDAS DE FRECUENCIA

Haciendo un resumen de los sensores, hemos visto que las características que sensan están íntimamente ligadas con la parte del espectro que utilizan, por lo que podemos agruparlos en:

- UV
- Ópticos
- IR
- Láser
- Radares milimétricos
- Radares en general
- Equipos sensores de guerra electrónica

En las páginas siguientes haremos un análisis de estos sensores, agrupándolos en aquellos que nos brindan la información que obtienen en forma de imágenes, los que nos la entregan en forma de señales, y finalmente los que nos permiten captar un contenido inteligente, sean datos o comunicaciones vocales.

PARTE II

LOS SENSORES DE IMAGEN

Podemos agrupar a casi todos los sensores en tres grandes áreas:

- Los que brindan la información en forma de **imagen**.
- Los que presentan lo que han captado como características de la **señal** detectada. Esta información se puede referir simplemente a la presencia de la emisión, o puede comprender su ubicación y sus parámetros.
- Los que podemos agrupar arbitrariamente en un tercer tipo de sensores: los de **contenido**; son los equipos COMINT. Para analizarlos nos apartaremos de lo que se entiende clásicamente como COMINT, ya que le prestaremos atención no tanto a las características del equipo de comunicaciones como transmisor o receptor, sino a la información que está siendo transmitida. A estos sensores a los analizaremos en forma separada de los otros dos agrupamientos.

Si consideramos los diferentes sistemas que presentan la información como **imagen**, éstos pueden ser agrupados por su forma de operar en: **pasivos** y **activos**.

A los **PASIVOS** los podemos clasificar en:

- Los que necesitan la **luz diurna** para operar en las frecuencias **ópticas**.
- Los que pueden funcionar con **bajo nivel de iluminación** (L^3 - Low Light Level).
- Los que captan las emisiones **IR**.

A los sensores de L^3 e IR también se los suele agrupar como equipos de visión nocturna (**Night Vision**).

Por su parte, los **ACTIVOS** están constituidos por:

- **Radares milimétricos**.
- **Radares de apertura sintética** (**SAR** – Synthetic Apperture Radar).
- **LADAR** (LAsEr Detection And Ranging), a veces también denominado **LIDAR** (LIght Detection And Ranging), que es un láser operado con los principios del radar.

ALGUNAS PARTICULARIDADES A CONSIDERAR

A continuación analizaremos algunas características y parámetros que definen capacidades y debilidades de los sensores.

Píxel, Resolución, Field Of View

PIXEL

Es la composición por contracción de las palabras **PICTure ELEMENT** (Elemento de Imagen); es la unidad de superficie de imagen, es una unidad en sí, aún cuando una costumbre muy popularizada lo suele describir en milímetros.

Lo que sí es posible es relacionarlo; por ejemplo, si se presenta una imagen de 2000 X 2000 píxels en una pantalla de 40 cm de lado, cada píxel tendrá un valor de superficie correspondiente de 0,2 X 0,2 mm; la misma imagen sobre una pantalla de 20 X 20 cm determinará que el píxel tenga un valor correspondiente de 0,1 X 0,1 mm.

La primera pantalla tendrá 5 pixel/cm y la segunda 10 pixel/cm.

RESOLUCION

También se puede relacionar la imagen en píxels con la escena que representa; así por ejemplo, si la imagen de 2000 X 2000 píxel representa una escena de 20 X 20 km, cada píxel tendrá un valor correspondiente a 10 X 10 metros; si la escena a representar tiene 10 X 10 km, cada píxel cubrirá 5 X 5 metros.

El píxel es el mínimo elemento discriminable en una imagen, y por tanto definirá la **resolución** de la escena representada por esa imagen, en los ejemplos que vimos recién, 10 X 10 m, ó 5 X 5 m.

FIELD OF VIEW / CAMPO VISUAL

Lo recién expresado nos muestra que con la misma cantidad de píxels podremos lograr una mayor o menor resolución, según sea el tamaño de la escena a captar.

A este tamaño lo podemos referir como una apertura angular o campo visual (**FOV** - Field Of View) que queremos cubrir, y que estará inversamente relacionado con la resolución que queremos lograr.

A igualdad de píxels, mayor resolución significa menor FOV, y viceversa, mayor FOV significa menor resolución.

El grado de resolución y el FOV requeridos dependerán del uso del sensor, y en algunos casos, un mismo sistema tendrá varios FOV con sus correspondientes resoluciones.

Normalmente se suelen considerar dos FOV:

- **Narrow FOV** (angosto): de aperturas menores a 20°, usados para reconocimiento e identificación de blancos, para su marcación, o para realizar la puntería.

- **Wide FOV** (ancho): de más de 20°, usados para observación, vigilancia, navegación, o adquisición de blancos.

Puede suceder que en algunos casos particulares se necesiten un gran FOV y una gran resolución pero no se disponga de la suficiente cantidad de pixels en la estructura de detectores. Una forma de lograr esa resolución es usar un **FOV "instantáneo"** (el que en ese momento capta el sistema), y un **FOV "total"**, producto de la integración de varios FOV instantáneos.

Actualmente se está en un cambio generacional en cuanto a las técnicas utilizadas para formar los FOV, por lo que trataremos de describirlas a todas.

Una de estas técnicas consiste en utilizar una rueda de espejos giratoria (micro scanner – mirrored wheel) que va enfocando la escena por partes sobre la estructura de detectores, la que permanece fija, y que sólo puede cubrir una parte de la escena por vez.

En este proceso, la parte de la escena enfocada por las ópticas del sensor es reflejada por uno de los espejos hacia los detectores; una vez detectada esta parte, se cambia de espejo para que refleje la parte siguiente de la escena, y se repite el proceso hasta que se completa la escena. A esta técnica se la conoce como **"entrelazado"**.

Por ejemplo, supongamos tener una escena de 20 X 10 km a la que queremos captar con una determinada resolución. Si usamos una estructura de detectores de 128 X 512 pixels (con la que sólo cubriremos 5 X 10 km, debido a la resolución buscada), y repetimos 4 veces el proceso, lograremos representar la escena en una imagen de 1024 X 512 pixels, a la que fuimos detectando de a cuartos. Y diremos que esta imagen tiene un entrelazado 4:1.

Más adelante veremos como la tecnología fue permitiendo aumentar la cantidad de detectores en una estructura, logrando grandes FOV con muy buenas resoluciones.

Soporte en el que Registran la Imagen

Entre los elementos a considerar cuando se analizan los sensores, se debe tener en cuenta cual es el tipo de soporte en el que registran la imagen que captan, este es un factor sumamente importante ya que indica la rapidez (CR) con que se dispondrá de la información.

Este soporte puede ser:

- **Wet Film** (película húmeda): se refiere a la película emulsionable que debe ser procesada en laboratorio, utilizando revelador, fijador, etc. Esto significa que la información que brinda no será en tiempo real, ya que la plataforma que porta la cámara debe llevar la película al sitio de procesamiento y realizar éste, que es relativamente lento, antes de tener acceso a la imagen captada.

Para su transmisión requiere otro proceso previo que también significa consumo de tiempo.

- **Dry Film** (película seca): Es la tipo polaroid, que permite el procesamiento a bordo de la misma plataforma del sensor, disponiendo de la imagen a los pocos segundos. Sigue siendo un elemento voluminoso, es caro, y para su transmisión tiene los mismos inconvenientes que el "wet film".
- **Video Tape** (cinta de video): En la década 80 se comenzó a utilizar componentes electrónicos sensibles a la luz en reemplazo de la película; de esta forma las ópticas enfocaban la imagen sobre un detector fotosensible, el cual, al ser alcanzado por los fotones liberaba electrones.
Esto permitió que la imagen fuese manipulada como si fuera una señal electrónica. Así surgieron los equipos electro-ópticos (**EO**) u optoelectrónicos, conformados por una parte óptica y otra electrónica. En esos tiempos, el soporte (la memoria) más adecuado que podía registrar esa gran cantidad de información era la cinta de video. Esta no requería procesamiento alguno, sólo bastaba una simple tecla "play" en el equipo adecuado; pero todavía era información secuencial y lenta, aunque ya tenía la posibilidad de ser transmitida directamente desde la plataforma del sensor a medida que era captada.
Para 1988 se logró utilizar la cinta de video para producir una imagen tipo fotografía; a esta técnica se la conoció como "**still video**" (video-fotografía), pero todavía era analógica.
- **Estado Sólido**: La evolución tecnológica finalmente permitió que mediante la utilización de dispositivos **CCD** (Charge Coupled Device / Dispositivo de Carga Acoplado) la información se registre directamente en memoria de estado sólido (como la RAM de las computadoras personales).
El uso de CCD, que se ha hecho también popular en todos los equipos comerciales, permitió la conversión de la información analógica en digital, con todas las ventajas que ello implica, sobre todo en su procesamiento y transmisión, ya que lo que se busca ahora de los sensores es el procesamiento a bordo en tiempo real, para una rápida y precisa marcación del blanco (dentro de su VTb).
Cabe aclarar que esta técnica utiliza un soporte magnético de cualquier tipo, sea cinta, disquete, CD o disco duro. Hasta hace unos años lo común era usar la cinta de video (como los video grabadores caseros) debido a la limitada capacidad de memoria que poseían los otros medios.

Los Equipos Optoelectrónicos

Como recién mencionamos, los sistemas optoelectrónicos o **EO** (electroópticos),

están compuestos por una parte óptica (las lentes) y una electrónica (del detector hacia atrás, es decir: detector > lector > conversor A/D > archivo, y transmisión o presentación).

Para su funcionamiento, una vez que los fotones activan el detector, éste los convierte en electrones, y el proceso que sigue es totalmente electrónico; y salvo los sistemas de L^3 (Low Light Level / Bajo Nivel de Iluminación) que utilizan válvulas intensificadoras de imagen, el resto de los sistemas utiliza componentes de estado sólido.

Según las características de los materiales que componen el detector, el sensor podrá captar imágenes en las longitudes de onda ópticas, IR cercano, o IR medio y lejano.

La mejor forma de describir su funcionamiento es relatando su evolución, para lo cual tomaremos como referencia un generador de imagen térmica o IR (Thermal Imager – TI), con la aclaración que lo que se describe a continuación se aplica a todos los sistemas EO, no sólo a los IR.

Los precursores fueron los IRLS (IR **Line Scanners** – barredor o escaneador lineal IR), llamados así porque la imagen era formada por el escaneado lineal de una franja de terreno directamente debajo y perpendicular al sentido de desplazamiento del avión portador. Este escaneado lo hacía mediante un espejo giratorio que enfocaba secuencialmente la imagen captada por las ópticas hacia un detector.

La señal detectada, que era producto de la conversión en electrones de los fotones que incidían sobre el detector, era amplificada y presentada en un tubo de rayos catódicos (TRC), el que actuaba como conversor de imagen, ya que sobre su pantalla se desplazaba una película emulsionable (wet film), en la que quedaba registrada la señal luminosa presente en el TRC.

El movimiento de avance de la plataforma permitía ir captando sucesivas franjas de terreno, las que se integraban para formar la imagen completa.

El ancho de la franja de terreno captada en cada escaneado lineal, dependía por tanto de las ópticas, de la altura de vuelo del avión, y de su velocidad de desplazamiento.

El paso siguiente fue colocar toda una línea de detectores, uno por cada píxel de imagen a captar. En los primeros experimentos se utilizaron 40 detectores por línea (o columna).

Había un problema a resolver: en la conversión a electrones también se produce ruido, el que era amplificado junto con la señal que nos interesa.

Este ruido tiene la particularidad que es gaussiano, es decir, no es siempre el mismo sino que se distribuye siguiendo una curva de Gauss, lo que hace que si se suman sucesivas detecciones, parte de ese ruido se anula a si mismo (uno con otro); lo que no sucede con las señales, que se suman.

Por eso se crearon ristras o tiras de detectores que aunque conservaban la misma cantidad por línea o columna (por ejemplo los 40 originales), cada elemento detector fue multiplicado por 4 en la misma posición dentro de la línea

o columna, con lo que constituían filas que captaban 4 veces la misma porción de imagen; y así se armó una estructura de 40 filas y 4 columnas. A estas estructuras se las referenciaba como 40 X 4, 180 X 4 (estas fueron las primeras europeas), o 288 X 4 (el standard europeo), mientras que USA adoptó 480 X 4.

También se las conoce como **TDI** (Time Delay and Integration / retraso de tiempo e integración).

Para describir su funcionamiento, si tomamos una de las filas de 4 detectores como referencia, la técnica consiste en retrasar (TD) proporcionalmente la señal de los primeros 3 detectores para luego hacer la suma (integración / I) de la señal captada por los 4 detectores.

Al integrarse la imagen que se recibe en forma repetitiva, tanto sea la señal como el ruido, aquella se multiplica por 4, mientras que éste, que como dijimos es gaussiano, se amplifica en la proporción $\sqrt{4}$ con lo que se refuerza la sensibilidad y la homogeneidad de la imagen.

Otro problema que se presentaba era la interconexión detector-lector de la señal, pues hasta entonces la conexión entre cada elemento detector y su lector se hacía por cable, lo que limitaba y hacía problemática la cantidad de conexiones, ya que los elementos medían 20 X 20 μ , a igual que la separación entre ellos.

Desarrollos posteriores encontraron como solución realizar pequeñas protuberancias de Indio (llamadas "bump") en la matriz de los elementos lectores, de forma que la matriz de detectores apoye directamente sobre ellos. Esto dio origen a los **CCD** (Charge Coupled Device / dispositivos de carga acoplados), que son circuitos que permiten la transferencia directa de las cargas eléctricas de los detectores a los lectores.

Adquirida esta tecnología, hubo un paso intermedio de estructuras de 288 ó 480 X 16, con lo que la relación señal ruido (S/N) era 4 a 1, antes de pasar a las estructuras bidimensionales, primero de 256 X 256 pixels (elementos detectores), y actualmente de 2000 X 2000 y mayores, que presentan la imagen completa.

En estas estructuras un mosaico de detectores cubre todo el FOV (campo visual), eliminando así la necesidad del escaneado. Fueron denominados **FPA** (Focal Plan Array / estructura en plano focal) y también "**Staring Array**" (estructura de visión fija), por contraste con los anteriores, los que funcionaban mediante el escaneo sucesivo, de línea por línea, o de las 4 ó 16 columnas en paralelo, y eran conocidos como **LS** (Line Scan / barrido o escaneado lineal).

Como ya vimos, al reemplazarse el "wet film" por la estructura de detectores, el sistema pasó de óptico puro a opto-electrónico, y la señal se pudo manipular electrónicamente; esto permitió la grabación sobre cinta de video, al principio aún en forma analógica, y después, al agregar convertidores A/D (analógico/digital) a continuación de los CCD, en forma digital.

Además, la disponibilidad de la imagen en forma de señal electrónica permitió su transmisión, primero también en forma analógica, y luego digital, y

ésta a su vez primero sin compresión y luego en forma comprimida.

Cuando se poseyeron dispositivos de archivo (memorias) de estado sólido con suficiente capacidad, éstos reemplazaron a las cintas de video.

Para terminar de mejorar las imágenes se buscó solución al movimiento de las plataformas que no siempre son lo suficientemente estables, especialmente cuando se usan LS, haciendo que a veces se produzca un "blurring" de la imagen (imagen borrosa). Para compensarlo se desarrolló el **FMC** (Forward Motion Compensation feature / dispositivo de compensación del movimiento de avance).

Los detectores que vimos hasta ahora son dispositivos que convierten la energía de los fotones en una señal que es proporcional a la cantidad de energía recibida, por eso se los conoce como **detectores de "efecto cuántico"**. Tienen el problema que parte de los electrones liberados producen el "ruido térmico" que ya mencionamos antes; la solución para esto, como veremos al considerar los detectores IR, es la refrigeración de los dispositivos, lo que también tiene sus correspondientes inconvenientes.

En procura de una solución se ha recurrido a **detectores bolométricos**, consistentes en composiciones de materiales que tiene la propiedad de variar su resistencia eléctrica en función de la cantidad de fotones que reciben; esto hace que se elimine el problema del ruido térmico, y por lo tanto también la necesidad de refrigeración.

Pero todavía resultan difíciles de producir, ya que el material detector debe ser extremadamente delgado para que pueda reaccionar rápidamente a los cambios en la cantidad de fotones que recibe.

Como el sustrato sobre el que se fabrican es el **CMOS** (Complementary Metal Oxide Semiconductor / semiconductor de óxido metálico complementario), es con este nombre que se los conoce.

En **resumen**, para la captación de imágenes podemos encontrar sistemas sensores:

- De escaneado lineal (**LS** – Line Scan), con procesamiento fotográfico y registro en wet film.
- De escaneado lineal electroóptico (**EOLS**), con:
 - Procesamiento analógico y registro en cinta de video.
 - Procesamiento digital y registro en cinta de video.
 - Procesamiento digital y registro en estado sólido.
- De visión fija (**Staring**) o **FPA** (Focal Plan Array / estructura en plano focal) electroóptico, con procesamiento digital y registro en estado sólido.

Asimismo, podemos agrupar a estos sensores de imagen según sus características de sensibilidad en:

- Los que necesitan la luz diurna para operar.
- Los de luz residual.
- Los IR.

SENSORES QUE NECESITAN LA LUZ DIURNA

Estos son los sensores más conocidos, por lo que no insistiremos en ellos. Sólo consideraremos algunos aspectos, en especial aquellos que son fruto del desarrollo de sensores digitales.

Visión Directa y TV

Los del tipo de **visión directa** y de visión mediante **TV** diurna siguen basados en los mismos conceptos, sea que se los utilice para las armas de defensa aérea o como visores para plataformas.

Fotografía y Video Digitales

Como vimos al hablar de los sensores en general, el gran cambio, sobre todo en fotografía, se debió a la posibilidad de reemplazar la película emulsionable (wet film) por un soporte de estado sólido, con lo que la imagen se hizo digital, con todas las posibilidades que ello significa.

Por supuesto, quien más se benefició con esta tecnología fue el reconocimiento aéreo fotográfico.

No han pasado muchos años, ya que la empresa Kodak logra la primera fotografía digital en 1991, desarrollando el "**DCS**" (Digital Camera System – sistema de cámara digital), que logra lo que denominan "**Still Video**" (video fotografía) **digital**, utilizando como base una Nikon F3, a la que le reemplazó la película por un FPA que tenía 1,3 Mpixels (1000 X 1200 elementos).

La cámara fue conectada a una computadora laptop con un software desarrollado por USNAVY llamado "LITE" (Laptop Imagery Transmission Equipment / equipo de transmisión de imágenes con laptop). Operada por el OSA (Oficial del Sistema de Armas) de un avión biplaza, permitió la transmisión en tiempo real de la imagen captada; esto contrasta con el procedimiento que se poseía con las cámaras de película, que necesitaban que el avión regresase a su base y la película procesada en un laboratorio antes de que la imagen estuviese disponible.

La cámara digital y la transmisión simultánea es la única que resuelve el problema tiempo para el targeting de blancos móviles.

Esta nueva capacidad permite que no haya misiones que ataquen blancos que ya fueron destruidos, o que no encuentren a las unidades móviles a las que fueron a atacar porque éstas cambiaron de ubicación. Igualmente solucionó los problemas que existían para el apuntado mediante comparación de imágenes.

Desde entonces hubo una gran evolución en las cámaras, tanto fotográficas como de video o TV; lo podemos apreciar cuando por unos pocos pesos podemos adquirir esta misma tecnología en cualquier negocio de fotografía.

Pero en el nivel superior, el de las cámaras para fotografía aérea, la

tecnología sigue siendo costosa; por eso en el mercado se pueden encontrar incluso cámaras antiguas a las que se les ha injertado un FPA en el plano que antes ocupaba la película.

Por ejemplo, a una vieja cámara KA-55 se le colocó un CCD de 32.000 X 8.000 pixels, con lo que logra imágenes a 20 Kft, con un ancho de barrido (swath) de 6 NM y 1 pie de resolución; cubriendo 600 millas náuticas cuadradas por hora. En algunos casos se utiliza como archivo un cassette de 8 mm (el común de video grabadora), en otros un disco duro removible o un ZIP, o una RAM en chip.

La segunda nueva capacidad que brinda la imagen digital está relacionada con su manipulación.

Una de sus aplicaciones es la detección de blancos móviles sobre el terreno; para ello se sacan 2 fotografías de la misma escena, una detrás de otra con 0,4 a 0,6 segundos de diferencia; luego se combinan las imágenes, superponiéndolas electrónicamente con polaridad inversa; de esta forma el proceso rescata sólo aquellos objetos que no coinciden, con un procedimiento parecido al que se aplicaba antiguamente con el MTI (Movil Target Indicator / indicador de blancos móviles) en radar, pero utilizando la información contenida en cada píxel como referencia. Este procedimiento incluso permite determinar la dirección y la velocidad de los móviles.

Asimismo, las dos posiciones de la plataforma permiten hacer una triangulación para determinar la distancia a los blancos, en el caso de las fotografías oblicuas.

La misma técnica permite bajar notablemente los tiempos para el análisis de las imágenes, ya que al superponer para comparar 2 imágenes sacadas con un cierto intervalo, inmediatamente van a resaltar aquellos objetos nuevos que fueron agregados a la escena, o aquellos que no aparecen en la segunda toma, además por supuesto de los que han sido desplazados.

Esto permite detectar, sin necesidad de un análisis, cualquier variación en la escena que indicará por ejemplo si ha habido actividad de los blancos móviles; y asimismo, analizando ahora si en detalle las imágenes, cuales blancos móviles no se han movido, sea porque están fuera de servicio, sea porque son señuelos, etc.

La imagen digital y su posibilidad de transmisión en tiempo real abrió otras capacidades.

Una de ellas fue solución para la evaluación del efecto de daño producido por las armas (**BDA** – Battle/Bomb Damage Assessment). Antiguamente era necesario un vuelo de reconocimiento para determinarlo; ahora, la imagen que capta el avión atacante que sigue, sea ésta óptica o IR, sea la provista directamente por los sensores del avión, o la captada por el seeker de la munición guiada y transmitida a la plataforma guiadora; ésta será la imagen que se transmitirá hacia los puestos comando para evaluar el efecto que produjeron las armas que lanzó el avión anterior.

Esta misma imagen es la que será utilizada por las misiones que siguen, en aquellos casos en que el seeker se basa en la comparación de imágenes; con lo

que se soluciona el problema que existía hasta hace unos años, de que los seekers no reconocían al blanco porque la forma de éste había sido modificada por los ataques anteriores.

Igualmente, el piloto no tiene que sufrir las presiones de los interrogatorios post-misión, ni se debe esperar su aterrizaje para saber que pasó; ya que todo lo que los sensores de la plataforma captaron, más la posición GPS y actitud de la plataforma en el momento de la captación, ya fueron transmitidas en forma inmediata.

Esto, además de permitir que el piloto se concentre en el ataque, elimina el grado de subjetividad que solían tener las apreciaciones post-misión.

Cabe aclarar que aún cuando hemos estado hablando de sensores ópticos de luz diurna, lo analizado es válido también para los sensores de luz residual y de imagen IR.

Las Cotas de Vuelo para la Fotografía Aérea

Por lo que hemos visto sobre las defensas aéreas, si el sensor nos obliga a volar por debajo de los 15 Kft, deberemos prever todo lo que la plataforma necesitará para supervivir, en especial si para las tomas se requiere que el vuelo sea recto y nivelado. Aunque, a la luz de lo demostrado en los últimos conflictos, lo más conveniente sería tener una buena dotación de aviones de reconocimiento, ya que la probabilidad de supervivencia sin duda es muy baja.

Esto nos lleva a que la verdadera solución es hacer el reconocimiento por arriba de esos 15 Kft. Pero aquí surgen dos problemas; aparte de la necesidad de disponer de equipamiento con la adecuada resolución para esas cotas, el cubrimiento de las nubes limita las oportunidades para captar imágenes ópticas; lo vimos en el conflicto de Kosovo.

Como referencia, estadísticamente, el cielo está cubierto alrededor del 75% del tiempo en los trópicos, y el 30 al 50% del tiempo en las zonas templadas.

Multi e Hiper espectral

Sabemos que en el espectro visible a cada color le corresponde una longitud de onda específica en la cual refleja la luz; cuando se analiza esta "respuesta espectral", no como colores, sino como la emisión o reflexión que producen los cuerpos (objetos) en las distintas longitudes de onda, se observa que un mismo cuerpo tiene una radiación o reflexión de características particulares para cada una de las distintas bandas o subbandas en las que se pueden dividir los espectros óptico e IR.

Esto se debe a que la composición de los cuerpos, o de su capa exterior en el caso de los opacos; es decir, los materiales de que están hechos, los minerales que componen el terreno, tipo de vegetación, sus condiciones de humedad, etc., hacen que sus emisiones sean más intensas en una frecuencia que en otra.

Esto ha permitido que, si se divide la banda del espectro a sensar en subbandas, según la reflectividad o emisividad que se detecta en cada subbanda se pueden determinar las propiedades físicas y la composición del cuerpo u objeto emisor.

En nuestro caso particular, esta técnica nos permitirá distinguir por ejemplo un tanque real, hecho en metal, de un señuelo hecho con caucho inflable.

También de esta forma se pueden detectar los blancos camouflados, dado que las respuestas del blanco y su camouflaje son diferentes en las distintas subbandas, o se lo puede detectar porque su emisión es diferente a la de la vegetación que lo cubre.

Es decir que, según sea la parte del espectro que se analice, se pueden obtener imágenes distintas pero que guardan una cierta similitud, y cada una expresa una determinada característica del objeto, la que no se detecta al observarlo con el espectro completo.

Por eso se comenzaron a subdividir las bandas en subbandas cada vez más estrechas, cada una con su correspondiente dispositivo detector.

El resultado de esto fue el diseño de sensores, primero **multiespectrales**, divididos en 2 a 15 subbandas, en el orden de 10 a 15 nanómetros de ancho; aunque lo usual es 4 bandas, en las frecuencias del verde, rojo, azul, e IR cercano.

La posterior evolución llevó al desarrollo de sensores **hiperespectrales**, con capacidad para analizar 100 o más subbandas. Un ejemplo es el dado por el satélite Mightysat II lanzado el 19JUL00, que cubre la banda de 0,45 a 1,05 μ con 145 subbandas o canales.

A la capacidad de discriminación que brinda esta subdivisión se la denominó **resolución espectral**, y en proporción, cada subbanda del hiperespectral abarca la décima parte de lo que cubre cada subbanda del multiespectral.

Como en cada una de las subbandas se forma una imagen completa, la que se debe procesar en paralelo con las otras imágenes del resto de las subbandas; esto se traduce en sistemas voluminosos y que requieren extraordinarias capacidades de archivo de la información y de su posterior procesamiento y comparación o integración.

Por eso lo normal es usar pocas subbandas, salvo que se requiera un análisis muy detallado y puntual. Lo clásico en estos casos es utilizar el sistema multiespectral con una de sus subbandas en el IR cercano.

Aún cuando por ahora el hiperespectral tiene más aplicación en el campo científico que en el militar, se espera que en el futuro sea usado para identificar los blancos mediante la determinación de su "impronta" (signature) dada por la composición de sus materiales. De esta forma la identificación se realizaría por resolución espectral en lugar de resolución espacial (imagen visual).

En el campo comercial ya se ha logrado que esta resolución espectral permita hacer, por ejemplo, un análisis de las cosechas o vegetación que posibilita

estimar:

- Contenido o producción de nitrógeno.
- Contenido de clorofila.
- Contenido de pesticidas.

SENSORES DE IMAGEN POR LUZ RESIDUAL

Estos sensores, también conocidos como “**Image Intensifiers**” (**I2**) (Intensificadores de Imagen), son pasivos, y se basan en la intensificación de la luz residual que existe durante la noche, normalmente de fuentes naturales como la luna o las estrellas; o la producida por fuentes artificiales. Basta esa poca iluminación para que puedan captar imágenes que son invisibles al “ojo desnudo”.

La agudeza visual del ojo humano en condiciones nocturnas medias, es de 20/200; con los intensificadores de imagen, esa agudeza fue llevada a 20/40, y últimamente a 20/30.

El corazón del sistema es una válvula amplificadora/conversora (image intensifier tube / válvula intensificadora de imagen) con un cátodo sensible a los fotones (fotocátodo), una grilla amplificadora (**MCP** – microchannel plate / grilla de microcanales), y una pantalla de fósforo que actúa como ánodo.

Los fotones de la luz residual estimulan al fotocátodo haciendo que éste emita electrones, éstos son encaminados a través del MCP, el que producirá la amplificación de la señal. El MCP es una placa con millones de microperforaciones: los canales. Los electrones al pasar por los canales chocan con sus paredes, produciendo el desprendimiento de más electrones en un efecto avalancha. El resultado es la amplificación de la débil señal de entrada.

El flujo de electrones luego choca con la pantalla de fósforo produciendo el desprendimiento de fotones cuya frecuencia de emisión es la que capta el ojo humano, al que llegan a través de un acoplador de fibra óptica.

Delante del fotocátodo se encuentra la parte óptica (las lentes) que dará la magnificación y el campo visual (**FOV** – Field Of View) de la imagen.

El clásico color verde-amarillento de las imágenes se debe al tipo de fósforo usado, el cual emite en el centro del espectro visual (el ojo vé entre las longitudes de onda de 390 y 760 nanómetros).

Aunque el elemento esencial es una válvula, los usos y costumbres han hecho que en castellano normalmente se lo llame “tubo”, por la traducción inapropiada del inglés “tube” (válvula), en la misma forma que se habla del “tubo” de rayos catódicos de un televisor.

Tipos de I2

Su uso más difundido es como “anteojos de luz residual” o de “visión nocturna” (**NVG** – Night Vision Goggles), pero también son empleados como miras para las armas o como sensores montados en plataformas, generalmente vehículos,

tanques y helicópteros.

ANTEOJOS DE VISION NOCTURNA O DE LUZ RESIDUAL

Los anteojos de visión nocturna pueden ser de mano (tipo anteojos de campaña) o ser parte de la indumentaria (wearables), originalmente con un arnés para la cabeza, y luego montados en el casco o integrados a él.

Pueden estar constituidos por un solo intensificador para los dos ojos, o por un intensificador para cada ojo. Ultimamente en USA se ha experimentado con los **PNVG** (Panoramic NVG / anteojos panorámicos) que utilizan dos intensificadores por cada ojo.

Estas variantes están relacionadas con el campo visual (**FOV** – Field Of View) y con la posibilidad de tener visión estereoscópica.

El FOV de la mayoría de los equipos es de 40° X 40°, algunos poseen 60° en el plano horizontal, y en el caso del PNVG éste es de 100°, de los cuales los 30° centrales son binoculares.

En el caso de su uso por pilotos, éstos tienen otras necesidades de visión, sobre todo el instrumental de cabina, que en muchos casos, todavía no está preparado para ser visto a través de los anteojos, ya que la luz que irradia es demasiado intensa, produciendo halos y el enceguecimiento del piloto, aún en el caso de los anteojos de última generación que poseen un control de ganancia que actúa en función de la cantidad de luz que reciben.

Una de las opciones es aprovechar la separación de aproximadamente 25 mm que queda entre el ojo y el antejo, y así mirar el instrumental por debajo de los anteojos, pero la adaptación de un tipo de visión a otro demanda un tiempo, tiempo que a veces el piloto no tiene.

Otra solución es la que utilizaba USAF hasta hace poco, que también es de tipo casero. Antes del vuelo se tapaba el instrumental con la película fabricada para proteger las ópticas de los efectos de los láser, la que sólo permite pasar las longitudes de onda del rojo e IR cercano; pegando además con velcro luces químicas (Chemglo Sticks) en lugares estratégicos de la cabina para que la iluminación fuese adecuada a los NVG.

Lo ideal es tener una cabina adaptada para los dos tipos de iluminación: con y sin anteojos.

El mismo problema de las fuentes de luz intensa se tiene cuando se vuela en formación, con las luces de posición del otro avión.

Otro problema más. En caso de tener que eyectarse, el peso de los anteojos fuera del eje de la columna produce un momento de fuerza que repercute en el cuello.

Buscando solución a todos estos problemas se está evolucionando hacia una presentación indirecta de la imagen, usando CCD para poder manipular electrónicamente la imagen y proyectarla holográficamente sobre un visor transparente incorporado al casco frente a los ojos del piloto, y con los **I2**

adosados o integrados al casco.

De esta forma la imagen de los intensificadores y la normal están integradas, y además, se le puede superponer información crítica para el vuelo o la misión, como si fuera un HUD (Head Up Display), dándole plena libertad de movimientos al piloto. Son los **HMD** (Head/Helmet Mounted Display / presentación montada en el casco).

El uso de CCD presenta otra ventaja; lo que el piloto "ve" se puede grabar, o se puede transmitir directamente a retaguardia, con lo cual el piloto se transforma en una fuente de información en tiempo real, más la ventaja de que el interrogatorio de inteligencia al regreso de la misión ya no es más necesario.

Aunque hemos hablado de pilotos, lo mismo es aplicable a los infantes o cualquier otro tipo de personal.

MIRAS PARA ARMAS

Las miras **I2** para las armas utilizan el mismo principio, y sólo cambia la parte óptica según sea el alcance de cada arma, permitiendo distinguir a una persona a 300 m, o detectar un blanco hasta 400 ó 600 m.

Sus FOV son más reducidos, entre 8,5 y 15°, estando la mayoría de los visores alrededor de los 10°.

MONTADOS EN PLATAFORMAS

En este caso los **I2** siempre van a estar acoplados a CCD que permitirán que la imagen sea presentada en una pantalla frente al usuario, por ejemplo, el conductor de un vehículo, que puede conducir perfectamente de noche sin luces, mediante una pantalla adosada a su parabrisas. Esta fue la solución a uno de los problemas que se detectaron en la guerra del Golfo: la logística, munición, etc. no podía seguir a los sistemas de armas de noche en forma discreta (sin luces).

TV DE BAJO NIVEL DE ILUMINACION

Estos sistemas, también conocidos como **L³ TV** (Low Light Level TV), están basados también en la intensificación de imagen. Su característica es que para la captación de la imagen el sistema de TV lo hace a través de un **I2**.

Hay dos técnicas distintas en las que se basan los sistemas. En la primera, un tubo de cámara de TV, equipado con una adaptación de fibra óptica, está acoplado al **I2**.

En la segunda, el cañón de la cámara de TV y el **I2** están contenidos en una misma válvula al vacío. Se los conoce como "Intensified Vidicons" (vidicones intensificados).

Los **L³ TV** son muy sensibles a las luces brillantes, por eso no han sido muy aceptados, prefiriéndose los equipos de imagen térmica.

El Rango de Frecuencias en las que Operan

La distribución espectral de la luz y sus reflexiones no es uniforme; depende de la fuente y de los objetos que la reflejan.

Por ejemplo, la luz de las estrellas está en el rojo y el IR cercano, la luz de la luna en el azul/verde. La vegetación refleja más el rojo y el IR cercano, las costas y el desierto el azul y el verde.

Los primeros **I2** trataban de cubrir principalmente el mismo espectro que el ojo humano, por eso los equipos cubrían entre los 350 y los 880 η (nanómetros).

Luego se observó que en las condiciones más críticas, con sólo la luz de las estrellas, la mayor iluminación provenía del rojo e incluso del IR cercano; y los intensificadores comenzaron a correrse poco a poco en el espectro, primero entre 450 y 950 η , y luego entre 600 y 1100 η . Y se acuñó el término de "dispositivos de espectro dual".

Asimismo, gran parte de la luz que molesta o daña, produciendo halos brillantes o saturación de luminosidad está en las frecuencias azul/verde, sucediendo lo mismo con los láseres llamados azules; esto llevó a que se procurara poseer poca sensibilidad en las longitudes de onda por debajo de los 600 η .

Performances

No hay normas precisas para evaluar las performances de los I2, lo más práctico es la comparación bajo condiciones idénticas; no obstante se puede considerar que:

- A bajos niveles de iluminación la performance dependerá de la relación S/N (señal/ruido).
- Con relativamente altos niveles de iluminación, será la resolución quien dé la performance; y a igual que la resolución óptica, puede estar dada en "pares de líneas/mm", en "miliradianes", o en "ciclos/miliradian".

Sus alcances están en el orden de los cientos de metros.

Son fácilmente degradables, sea con una iluminación intensa y continua que capture el CAG (Control Automático de Ganancia), sea con una radiación, normalmente en el IR cercano, en forma de flash y con una cadencia tal que puede provocar la desorientación espacial del usuario.

Basados en la forma en que fueron evolucionando, se los agrupa por generaciones:

- GEN 0: Disponible en los años 50 y 60, tenían una sensibilidad de 60 μ amperes/lumen; operaban en la región del azul-verde y la mayoría necesitaba recurrir a un iluminador IR.
- GEN I: Se mejoraron los fotocátodos, con lo que se alcanzó una

sensibilidad de 180 – 200 μ amperes/lumen. Fueron los primeros realmente pasivos.

- GEN II: En los años 70 se comienza a utilizar el μ channel plate (MCP), lográndose sensibilidades de 250 - 300 μ amperes/lumen; utilizando también el IR cercano.
- GEN III: En los años 80, nuevos fotocátodos y MCP logran una sensibilidad de más de 800 μ amperes/lumen, cubriendo las longitudes de onda de 450 a 950 nanómetros.
- GEN IV: A fines de los años 90 se soluciona un problema de emisiones de retroalimentación que tenía la GEN III, y se mejora la relación S/N, logrando imágenes más limpias.

SENSORES DE IMAGEN TERMICA

Son conocidos como **TI** (Thermal Imagers).

Ya vimos que en la parte media del espectro IR se encuentran dos "ventanas" de buena transmitancia, una entre 3 y 5 μ conocida como de **IR medio**, y otra entre 8 y 12 μ (algunos la extienden hasta 14 μ) llamada de **IR lejano**; las que son utilizadas para captación de imágenes IR.

Las condiciones ambientales y meteorológicas afectan a ambas bandas, haciendo que lo que es bueno en determinadas condiciones ambientales, es malo en otras; por eso es vital saber sobre los regímenes meteorológicos y de temperatura, y como afectan a las bandas.

Por ejemplo, la de 3 a 5 μ es menos afectada por las variaciones de temperatura atmosférica ambiente, pero es más dispersada por el humo y neblina. Igualmente, la hora del día hace que su comportamiento sea distinto, las peores horas son del amanecer al anochecer; sobre todo en la banda de 8 a 12 μ la imagen a veces se ve un poco velada entre las 4 y 7 PM.

Con las temperaturas típicas diurnas que van de 10 a 35°, la longitud de onda de la emisión IR de la mayoría de los cuerpos y objetos naturales es de 10 μ , longitud de onda que se transmite fácilmente a través de neblina, bruma, polvo y humo.

Vemos así que la temperatura de los objetos y su entorno son muy variables, ya que dependen del estado operativo del blanco, la hora del día, la meteorología, el tipo de entorno (árboles, pasto, arena, desierto, etc.) y la ubicación geográfica.

Por otra parte, como la representación del ambiente se realiza sobre la base de las diferencias térmicas en lugar de las cromáticas como es el caso de la luz visible, el IR permite detectar un número de detalles diferentes; por eso puede superar el enmascaramiento visual, o puede descubrir otra información relacionada con la temperatura y que la imagen visible no muestra.

Por ejemplo, se puede saber si un vehículo acaba de ser usado por las radiaciones de sus cubiertas o el motor. Asimismo, los objetos calientes dejan una imagen térmica en el lugar donde estuvieron colocados (detenidos): un avión que acaba de ser movido, deja su impronta marcada por un cierto tiempo en el lugar de la plataforma donde estuvo estacionado.

Si se compara a los TI con los I2, los primeros tienen mayor alcance y pueden ser usados con cualquier intensidad luminosa, tanto de día como de noche sin recaudos especiales; tenían los inconvenientes de precio y volumen, pero las últimas tecnologías los han ido solucionando, por lo que paulatinamente van reemplazando a los I2 en las instalaciones en plataformas.

Los Detectores y su Refrigeración

La captación en el espectro IR se basa en la conversión en señal o imagen de la energía irradiada.

Los elementos conversores de esa energía son los detectores, cuya sensibilidad es función de la composición de los materiales de que están fabricados. La más utilizada es una composición de Cadmio, Mercurio y Telurio, y por eso normalmente los detectores son referidos como "CMT"; a veces también se los menciona como "fotovoltaicos" o "de fotoconducción", esto es por la forma en que fueron fabricados.

También se los llama "cuánticos", ya que la señal eléctrica que emiten es proporcional a la cantidad de radiación de energía que están captando.

La composición CMT es una de las más sensibles en ambas bandas, y para operar en una u otra banda sólo es necesario ajustar la proporción de sus componentes en el momento de su fabricación.

Cuando la radiación IR que incide sobre los detectores es convertida en electrones, éstos no se desplazan todos en la misma dirección al ser liberados, sus vectores velocidad tienen dos componentes, una en el sentido axial: la deseada de desplazamiento, y otra tangencial. Esta componente tangencial va a provocar una agitación de los electrones que se conoce como "ruido térmico" o "electrónico".

Este ruido será el causante del pobre rendimiento del sistema debido a una baja relación S/N (señal/ruido). Para mejorarla (para "aquietar" a los electrones), los dispositivos deben ser refrigerados.

Aquí hay dos elementos que intervienen, uno es la energía de los fotones, la que disminuye a medida que aumenta la longitud de onda, disminuyendo por lo tanto la señal que producen. Por eso se necesita menos enfriamiento para disminuir el ruido en la banda 3 a 5 μ que en la 8 a 12 μ .

El otro aspecto que influye en la necesidad de refrigeración está dado por los materiales de los que está compuesto el detector, por lo que algunos necesitan más refrigeración que otros.

Existen unos materiales llamados "piroeléctricos", que permiten su

funcionamiento con poca o ninguna refrigeración; pero no debemos olvidar que los materiales de la composición del detector son los que establecen su sensibilidad según la banda de frecuencias de operación, y por ahora los piroeléctricos encontrados no satisfacen las expectativas.

Mientras tanto, para tener una buena relación S/N los detectores que operan en la banda de 3 a 5 μ deben refrigerarse a aproximadamente 175°K (grados Kelvin, -98°C), mientras que los de 8 a 12 μ deben estar a 77°K (-196°C).

A estos valores generales se les deben agregar las variaciones que son función de las características propias de los materiales usados en el detector.

Existen dos tipos de refrigeradores:

- **Termoeléctricos**, o de técnica **Peltier**: Se basan en las características de disipación de calor que tienen algunos elementos cuando pasa una corriente eléctrica. Son aptos para refrigerar a 175/210°K a los sistemas que operan en 3 a 5 μ .
- **Criogénicos**: conocidos como refrigeradores de **ciclo cerrado** o **Joule Thomson**. Utilizan gases licuados y funcionan igual que una heladera doméstica. Son los que más enfrían y son necesarios cuando se quiere utilizar la banda 8 a 12 μ , que opera a 77°K aproximadamente.

Los Tipos de TI

Según la forma en que se realice el barrido de captación IR y se procese la información, dispondremos de ésta en forma de imagen (mediante un **TI - thermal imager** / generador de imagen térmica), o en forma de un punto caliente (hot spot) en el espacio.

Por ahora sólo trataremos los generadores de imágenes térmicas (TI).

El principio de funcionamiento ya fue descrito cuando lo utilizamos como base para explicar como había sido la evolución de los dispositivos detectores en general. A esa descripción la tomaremos como referencia en el análisis de los distintos sistemas que haremos a continuación.

IRLS / SLIR

Como vimos, el **IRLS** fue el precursor de los sistemas de imagen IR, montado en la parte inferior de un avión, lograba las imágenes por el escaneado sucesivo de franjas de terreno, el que combinaba con el desplazamiento del avión portador para formar las imágenes; por lo que se debían sincronizar la velocidad de escaneo y la velocidad del avión para que ocurriera una continuidad de la imagen.

Actualmente a nivel internacional se pueden encontrar, desde el primitivo sistema que utilizaba película (wet film) como soporte, hasta los de tipo "staring", a los que en realidad no correspondería llamar "line scanning", pero los usos y costumbres han hecho que se lo clasifique como IRLS.

Tomando como base el mismo principio, cuando las cámaras se colocaron en posición oblicua para captar imágenes laterales, surgieron los **SLIR** (Side Looking IR / IR de visión lateral).

FLIR

El **FLIR** (Forward Looking IR / visión IR hacia delante) fue la evolución lógica cuando los sistemas pudieron liberarse del wet film y presentar la información en forma de imagen en una pantalla.

Fueron llamados FLIR porque en su primera aplicación fueron montados en los aviones de ataque al suelo para lograr una visión hacia el frente que posibilitara la navegación y detección de blancos terrestres durante los vuelos nocturnos. El término se difundió tanto que a veces se aplica para definir a cualquier TI.

Aunque todos se basan en dispositivos optoelectrónicos, se encuentran aquellos que usan el escaneo lineal (**LS**), por ejemplo con estructuras (arrays) de 480 X 4 elementos detectores; o los que usan la imagen de visión fija (**staring**) o FPA, por ejemplo con estructuras de 480 X 640 detectores.

Se los suele agrupar por generaciones (de evolución tecnológica):

- Gen I: Son los de escaneo lineal de una sola línea o columna.
- Gen II: Son los TDI; por ejemplo de 480 X 4 elementos.
- Gen III: Son los FPA o staring.

El alcance también fue evolucionando con las generaciones, así ahora se dispone de FLIR que pueden: detectar un vehículo en movimiento a 50 km o más, e identificarlo a los 20 km o más.

Cuando se usa abordaje de un helicóptero cumple las mismas funciones, con la ventaja, si está montado en una torreta en la parte inferior o en un mástil sobre el rotor, que tiene un campo visual total (**FOR** – Field Of Regard, a veces también llamado **TFOV** – Total FOV) (el campo visual total que puede cubrir el FOV cuando se lo gira o desplaza), de 360°.

Navegación y Targeting

El FLIR es utilizado en dos funciones: navegación y "targeting" (detección y marcación de blancos), debido a que para un buen lanzamiento de las armas se necesita una buena navegación de aproximación.

Ambas funciones tienen requerimientos diferentes: mientras para la navegación se necesita el mayor FOV posible, que le permita al piloto apreciar la situación de su entorno y le facilite las corridas a baja altura, para el targeting se necesita una imagen lo más definida posible para poder reconocer e identificar los blancos, y que esto se pueda hacer lo más lejos posible.

Ello hace que los FLIR tengan al menos 2 FOV, y deseable 3 FOV, para:

- Navegación: con un FOV de aproximadamente 20° X 25°.

- Detección del blanco: con un FOV que oscila en los 5° X 5°.
- Selección del blanco: con valores de FOV de alrededor de 1° X 1°.

Como en los aviones de ataque la imagen se mueve muy rápidamente con respecto al avión, el régimen de escaneado debe ser alto, y los tiempos de integración de la imagen deben ser bajos, para asegurar que lo que el piloto ve es la escena real de ese momento.

USO PARA NAVEGACION: Aunque para navegación se dispone del radar de seguimiento del terreno (Terrain Following Radar), se prefiere el FLIR por ser discreto, ya que no emite.

El FOV de 20° a 25°, aunque amplio, lo mismo es una limitación para navegar con comodidad y con cierta seguridad, sobre todo en los virajes a baja cota, ya que el piloto sólo ve dentro de esos aproximadamente 20° X 25°.

Por eso para algunos FLIR se desarrollaron las capacidades "snap look" (dar una ojeada) y "look into turn" (mirar hacia el viraje), que permiten apuntar el FLIR hacia el costado o hacia el lugar hacia donde se va a realizar el viraje.

Esto hace que un parámetro importante, válido también para targeting, sea el desplazamiento angular que puede cubrir el FLIR haciendo que las ópticas cabeceen o roten independientemente del avión: el llamado FOR o TFOV.

Como ayuda para la navegación, usualmente son complementados con una base de datos del terreno, integrada con el sistema de navegación y con un generador de símbolos de vuelo para proveer detalles de altitud y velocidad, así como información de precaución.

USO PARA TARGETING: Cuando se analiza todo el proceso de targeting, se aprecia que el blanco puede ser alcanzado por una munición guiada:

- Mediante la iluminación permanente del blanco (por ejemplo con un láser) para que la munición se guíe por la señal del iluminador (homing semiactivo o haz cabalgado).
- Mediante un enlace de transmisión de comandos a la munición (guía por comando o seguimiento vía misil).
- Utilizando una munición con capacidad de autoguía (autotracker) (homing activo o pasivo).

Este último es el sistema ideal, ya que es del tipo lanza y olvida, es decir que permite liberar a la plataforma apenas lanza el arma. Pero es el más sofisticado y caro; los otros son más baratos y simples, pero obligan a la plataforma a mantener enganchado al blanco durante la operación, más cerca o lejos del blanco y de las armas que lo defienden, según sea el designador elegido.

En el caso del avión como plataforma, se recurre normalmente a un designador láser (laser designator) para el guiado semiactivo, ya que el alcance del láser permite que el avión permanezca a 10 km del blanco, una distancia de relativa seguridad, sirviendo además como medidor de distancia (range finder) ya que el FLIR no tiene capacidad para medirla.

Existe por supuesto la posibilidad que el designador esté montado en otra plataforma o sea operado por un OCAA (Oficial de Control Aéreo Adelantado) en tierra.

Los conflictos de Bosnia y Kosovo mostraron como muy importante una vulnerabilidad del láser; éste no puede atravesar nubes o humo, y en ambos conflictos muchas de las misiones debieron ser abortadas por nubes bajas.

Anteriormente se habría ido con el láser por debajo de las nubes, pero como ya dijimos antes, la poca supervivencia de los aviones debajo de los 15Kft hace que este tipo de procedimiento no se practique más, salvo cuando la situación lo justifique.

Volviendo al FLIR; para el targeting utilizará 2 FOV; uno relativamente ancho (**wide FOV**) para adquirir el blanco, cambiando a otro angosto (**narrow FOV**) con una gran resolución y magnificación del blanco, que permite su reconocimiento e identificación.

Esta necesidad de identificación determinará un rango máximo en el cual es factible realizarla, lo que a su vez creará una situación de compromiso con el alcance de las armas a utilizar; y también con un tercer alcance, el de las armas que defienden al blanco, las que a su vez determinan que el FLIR debe tener capacidad para detección del blanco desde fuera del alcance (stand-off); normalmente en el orden de los 20 a 30 km.

Pero si se necesita confirmar la identidad del blanco en forma visual (por TV por ejemplo) o IR, el avión se debe acercar a los 4 km, y por lo tanto de poco sirven los misiles de alcance mayor, lo cual determina que los misiles a utilizar sean los de un alcance de aproximadamente 4 km, y que además se tomen recaudos para la aumentar la supervivencia del avión, que ya no estará fuera de alcance.

Hay todavía otros factores a considerar, ya que el FLIR también debe llevar al avión hasta el "basket" (la canasta) de lanzamiento de las armas: el cilindro que se crea sobre el blanco y dentro del cual se deben lanzar las armas para asegurar su guiado e impacto en el blanco.

En algunos casos, según la altura y distancia de lanzamiento, el blanco se va por debajo de la trompa del avión, por lo que algunos FLIR tiene capacidad para mirar más hacia abajo mediante el **DLIR** (Downward Looking IR / visión IR hacia abajo).

Este aspecto ha pasado a ser importante, ya que aunque los FLIR originalmente fueron desarrollados para ataques a baja cota, los riesgos que implica volar por debajo de los 15 Kft han promovido los ataques a cotas medias y altas, y por lo tanto los FLIR ahora deben operar adecuadamente a estos niveles, para darle una relativa seguridad a la plataforma que lo porta, al volar por encima de la mayoría de las amenazas.

También deben tener muy buena capacidad de reacción y precisión de apuntado, ya que deben seguir al blanco no importa cual sea la maniobra que realice el avión.

El FLIR Para el Reconocimiento e Identificación de los Blancos

Para determinar algunos parámetros de los FLIR se pueden usar algunas normas de referencia; por ejemplo, si se requiere una identificación precisa de los blancos, estos deben ocupar el 10% del FOV aproximadamente.

Para poder identificar a un blanco de 10 m a 20 km, éste ocupará un ángulo de 0,5 mils (miliradianes), lo que significa que se necesita un FOV de alrededor de 5 mils ó 0,286 grados; por eso vemos que la mayoría de los sistemas prácticos tiene valores de alrededor de 1 grado de FOV para la selección del blanco.

Manteniendo como referencia ese blanco de 10 m, y como la mayoría de los FLIR tienen una resolución aceptable hasta los 6 a 10 km; si se desea obtener la adecuada resolución para la identificación, se necesita una gran magnificación óptica; pero ésta no es siempre la solución, ya que con los actuales generadores de imagen IR, al magnificar las imágenes éstas tienden a volverse borrosas (blurring); por eso se debe recurrir a acercarse o a otros dispositivos.

Si el problema es el fratricidio, con el FLIR se pueden utilizar medios para identificar por descarte aunque implique riesgos: si responde es propio, si no, es enemigo. Es el principio en el que está basado el IFF.

Este principio es el que se aplica cuando se recurre al empleo de paneles o marcas IR identificatorias, como las que se utilizaron en la guerra del Golfo, basadas en el uso de cintas térmicas (thermal tape) con muy baja radiación IR, formando figuras fácilmente identificables al observarlas a través de visores IR.

Otros usan una luz estroboscópica de gas xenon, emitiendo en el IR cercano con un régimen de 50 flashes por minuto.

Después del Golfo se comenzó a desarrollar otro dispositivo, que consiste en 2 placas de 30 X 30 cm colocadas sobre un mástil una contra otra formando un diedro; una de ellas se calienta mientras que la otra se deja a temperatura ambiente. Al hacerlas rotar a una determinada velocidad producen un parpadeo IR que permite identificar a la plataforma portadora.

Pero si lo que se busca es la identificación cierta para evitar daños colaterales, se debe recurrir a sensores complementarios, por ejemplo TV o I2, pero no olvidando que sus limitaciones en rango se traducen en limitaciones para el lanzamiento de las armas y en riesgo para la plataforma.

La identificación por TI se basa en parámetros distintos de los visuales y que resaltan en el IR; en los tanques por ejemplo, los motores, los escapes, o las orugas cuando ruedan.

A veces se genera un concepto erróneo cuando se muestran fotos IR, I2 y visuales muy parecidas, pero que fueron sacadas a unos pocos metros del objeto.

En la realidad interesa la nitidez, pero a la mayor distancia posible; y a esta distancia las formas y rasgos identificatorios IR son diferentes de los visuales, ya que lo que se destaca son los elementos de mayor radiación y no las formas.

Esto obliga a aprender a conocer los blancos según como se los ve en las imágenes IR, las que varían si el blanco está quieto o andando, si acaba de

disparar, si su motor está encendido o apagado, etc.

En el caso de los aviones, estos se ven bastante parecidos a su silueta visual, debido a la radiación IR producida por la fricción del aire sobre sus superficies.

En los helicópteros, las superficies no se calientan como en el avión, pero los motores y su posición se destacan a gran distancia permitiendo su identificación, por eso el IR se utiliza bastante como sensor pasivo de las defensas aéreas.

El calentamiento del fuselaje que producen los escapes también forma siluetas distinguibles. Asimismo, debido al efecto de barrido estroboscópico de los TI, los rotores aparecen como detenidos, permitiendo contar las palas. Y el cristal de la cabina se marca claramente como una zona de muy baja radiación, ya que no permite el paso de las radiaciones que hay en su interior, reflejando el cielo frío que la rodea, y permitiendo distinguir su forma.

A veces facilita la identificación la posibilidad de poder variar la polaridad de la imagen, es decir que se puede representar: lo más caliente como blanco, o lo más caliente como negro.

SEEKERS POR TI

La traducción correcta que expresa el concepto "seeker" sería "perseguidor", ya que es usado a bordo de la munición para que ésta persiga al blanco, pero los usos y costumbres hicieron que se los referenciara como buscador o seguidor.

Los primeros **seekers** IR eran del tipo "hot spot" debido a las limitaciones tecnológicas de entonces, puesto que para detectar blancos como imagen contra un terreno de fondo se necesitan: una imagen 2D (del tipo FPA) y algoritmos adecuados para procesar esa imagen y resaltar el blanco. Cuando esto fue posible y los dispositivos TI se hicieron lo suficientemente pequeños como para poder ser montados en la proa de la munición guiada (misiles y bombas), comenzaron a ser utilizados, por similitud con los seekers de TV, para el guiado de esa munición.

La ventaja de los seekers por TI sobre los de TV es que proveen mayores rangos de adquisición, pueden detectar blancos que están oscurecidos por la niebla o el humo, y pueden detectar blancos que están bien enmascarados visualmente.

En contraste, los seekers por TI son caros, más si se requiere que sean completamente autónomos.

El procedimiento de targeting con los seekers por TI requiere, como en todos los casos, una detección y designación del blanco; lo que permitirá realizar luego el seguimiento y guiado de la munición, sea que éstos sean automáticos (autotracker), sea que intervenga un operador humano en el proceso.

Este tipo de seeker por TI abre la posibilidad de solución a un problema aún no resuelto de la identificación fehaciente del blanco para evitar el fratricidio.

En USA, el Sidewinder AIM-9X es el primer misil aire-aire de corto alcance que utiliza un TI como seeker. En este caso el objetivo de obtener una imagen del

blanco no es tanto su detección; lo que se busca es lograr hacer que el misil sea inmune a las contramedidas actualmente existentes.

Munición con Autotracker

Hay dos formas de realizar la detección y designación del blanco:

- Utilizando el FLIR de la plataforma: Mediante éste se comanda al TI de la munición, apuntándola en forma coincidente con el FLIR; una vez que se localiza el blanco con el FLIR, se lo designa y transfiere al TI de la munición, el cual registra esa imagen y el blanco (el punto a apuntar) como imagen de referencia.
A partir de aquí el seeker está en condiciones de realizar el seguimiento y guiado automático en forma completamente independiente de la plataforma. Una vez lanzada la munición el seeker va comparando continuamente la imagen que capta con la de referencia, relocalizado el blanco y corregida la trayectoria, la nueva imagen pasa a ser la de referencia, y así sucesivamente hasta el impacto.
- Utilizando el TI de la munición guiada: En este caso el sistema permite que en la cabina se pueda visualizar la imagen que está recibiendo el TI de la munición; utilizando esta información se realiza la detección y selección del blanco en la misma forma que con el FLIR; la imagen es registrada como referencia y la munición está en condiciones de ser lanzada.
Los procedimientos de seguimiento y guía son los mismos recién descritos.

Seguimiento Vía Misil

Este procedimiento también es conocido como "man in the loop" (hombre dentro del ciclo), ya que la información captada por el sensor del misil, no es procesada por él, sino que es transmitida y presentada a un operador para que éste comande a la munición guiada.

Los procedimientos para la detección y designación del blanco son los mismos que los explicados para el autotracker.

La diferencia está en el seguimiento y la guía. En el autotracker todo el procesamiento es realizado abordo de la munición, independizándola de la plataforma lanzadora; en el seguimiento vía misil en cambio, el procesamiento se realiza en la plataforma.

La imagen que capta el TI de la munición guiada es transmitida a la plataforma que la lanzó, en ésta el Oficial de Sistemas de Armas (OSA), usando esta imagen como referencia, envía comandos de guía a la munición para corregir su trayectoria hasta el impacto.

GPS y Seeker

La posibilidad de uso del GPS permitió desarrollar munición guiada para ser lanzada desde fuera del alcance, no sólo de las armas del enemigo, sino también fuera del alcance de los sensores de la propia plataforma.

La munición, que es lanzada sin ver al blanco, realiza una navegación por Inercial/GPS hasta un punto dentro de la canasta del blanco, en donde ya se encontrará a una distancia tal que le permita captar al blanco con su TI.

Y aquí se pueden dar las dos situaciones que antes vimos: que la imagen sea usada para autotracker, o que sea transmitida a la plataforma que está fuera de alcance para que el OSA realice el guiado por comando.

En el caso del guiado por autotracker, la munición escanea la escena en busca de una imagen que coincida con la de referencia que tiene archivada, la que en este caso, a igual que sucede con los misiles de crucero (CM), ha sido obtenida previamente por otros sensores. Por supuesto, a igual que con los CM, el blanco debe reunir ciertas características de imagen que resulten fácilmente identificables, ya que no hay un humano que lo designe.

Por eso lo usual es utilizar el procedimiento de guiado vía misil que antes vimos, en donde el OSA recibe la imagen que está captando la munición, y en base a ella localiza el blanco y realiza el guiado hasta el impacto.

Otra Munición Guiada

Aunque hasta aquí se ha hablado de bombas guiadas y misiles aire-superficie, los mismos conceptos y procedimientos son aplicados para los misiles antitanques, sean lanzados desde tierra o desde helicópteros, así como la munición guiada antibuque.

En el caso de los antitanque desde helicóptero, buena parte de los TI disponibles satisfacen los rangos y la resolución necesarios como para ser empleados como seekers de estos misiles, ya que el alcance de la mayoría de ellos oscila entre los 4 y 5 km. Hay algunos casos, como las últimas versiones de Hellfire, en donde los TI actuales se vuelven marginales cuando los alcances son de 8 a 9 km o más, es por eso que a veces se recurre al radar milimétrico en lugar del TI.

Hay un seeker que es un híbrido por la forma particular en que presenta la información que obtiene, por lo que normalmente no es considerado como por TI. Tiene una presentación circular que es producto de la forma en que se realiza el barrido para obtener la imagen. Es un escaneador lineal (LS) que barre radialmente y permite enganchar y seguir blancos aéreos.

TI COMO VISORES DE TANQUES Y VEHICULOS DE COMBATE

Son los derivados lógicos de los FLIR; por eso a menudo también se los

denomina FLIR, aunque en realidad son más simples.

Su principio de funcionamiento es similar a los IRLS o los FLIR, pero las menores velocidades de las plataformas permiten que para algunas aplicaciones no se necesite un "staring FPA", y sea plenamente satisfactorio un LS paralelo.

Los más comúnmente usados actualmente son los denominados de segunda generación, por ejemplo de 480 X 4 elementos. Estos permiten ver un camión a 5 km y un tanque a 6 km.

Hasta los 500 metros aproximadamente permiten apreciar las formas de los objetos; más allá la imagen se va transformando en puntos calientes; ya que debido a la sensibilidad del sensor y a la atenuación por distancia, los elementos que se siguen detectando son sólo los de mayor radiación.

Recurriendo al cambio de la polaridad de la imagen, que hace que lo más caliente sea visto como negro o sea visto como blanco, se pueden reconocer distintas características del blanco.

La mayoría opera en los 8 a 12 μ , y no necesitan una gran refrigeración.

Normalmente están complementados con ópticas de visión directa y con TV diurna.

En el caso de los **TANQUES**, se los puede emplear en tres funciones:

- **Visor del Comandante:** Le permite vigilar el campo de batalla e identificar blancos mientras el sensor principal es utilizado para enganchar los blancos que él ya identificó y fueron pasados al artillero. Tiene un FOV de aproximadamente 45° en horizontal por 35° – 40° en vertical y puede rotar en los 360 grados para poder observar todo el entorno. También puede ser empleado para adquirir los blancos.
- **Visor para el Control del Fuego;** (artillero): Dispone de un TI (en algunos tanques es un I2, lo que significa limitación en alcance) combinado con un medidor de distancias láser (laser range finder), y una computadora para el targeting. El alcance que debe poseer para enganchar los blancos es de 3 km o más.
- **Visor para el Conductor:** Aún cuando las distancias involucradas para conducir y evitar obstáculos permiten usar un I2, para asegurar la operación en total oscuridad, mal tiempo o humo del combate, es conveniente que posea un TI. Este le da capacidades para navegar y reconocer particularidades del terreno.

A veces, debido a los costos de los TI, un tanque tendrá un TI de largo alcance para el Comandante y un I2 de corto alcance para el conductor.

Los sensores del tanque suelen ser uno de sus puntos más vulnerables, ya que la coraza va a proteger al tanque, pero no al sensor, que normalmente debe sobresalir de la coraza; incluso en algunos casos, la misma coraza reactiva puede dañar al sensor, degradando al tanque como sistema de armas, aún cuando todavía pueda rodar, tirar y tener visión óptica directa.

Para el **resto de los vehículos** se suele conectar el TI a una pantalla tipo TV

frente al conductor.

Comparado con un I2, el TI es superior, pero su mayor contra es su diferencia de precio, que puede rondar entre 5 a 10 veces el de un I2.

TI PARA RECONOCIMIENTO TERRESTRE

Más simples y livianos, pueden ser empleados montados en vehículos de reconocimiento, o portados por infantes, sea con trípodes o como binoculares.

Permiten detectar vehículos a 3 – 4 km.

TI COMO MIRAS PARA ARMAS

Hasta hace poco, el costo, peso, tamaño y necesidad de gran refrigeración de los TI los hacía difíciles para ser usados como miras; pero a mediados de la década 90, cuando la tecnología fue solucionando esos problemas, comenzaron a reemplazar a los I2 en las armas de mayor alcance.

Hacia 1996 comenzaron a usarse también como miras para rifles, con dos tipos de lentes telescópicas: "medium sight" hasta 1.100 metros, y "heavy sight" hasta 2.200 metros; con un peso cercano a los 2 kg. Al tener más alcance, han comenzado a ser empleados en lugar de los I2.

TI PARA DEFENSA AEREA

En defensa aérea, tanto para sorprender al enemigo como para sobrevivir a los misiles antirradiación (ARM – antiradiation missile) se debe recurrir a los sensores pasivos.

En aquellos basados en las radiaciones IR se deben distinguir dos tipos de sensores: los que detectan imágenes; y los que detectan sólo puntos calientes (hot spot) contra un fondo homogéneo (el cielo).

Aunque a estos últimos los veremos al analizar los IRST (IR Search and Track – Búsqueda y Seguimiento IR), haremos aquí una pequeña consideración.

Si el sensor IR es por imagen, es el hombre el que debe buscar al blanco dentro de la imagen; si es un hot spot IR, el blanco se destaca fácilmente contra el fondo homogéneo y relativamente frío del cielo, por lo que la detección se puede hacer incluso automáticamente.

Además, como lo que busca el hot spot es una diferencia de radiación y no una imagen, los alcances pueden llegar a los 10 – 15 km. Por eso los que utilizan TI se emplean para:

- Vigilancia y detección de blancos, particularmente helicópteros, a corta distancia, ya que lo que se busca es la captación de la imagen del blanco para su identificación.
- Designación y seguimiento de blancos, montados colinealmente con otros sensores, radar y TV por ejemplo, en las baterías superficie-aire.

Como dijimos, al ser pasivos tienen la ventaja sobre los activos como radar o láser, que no pueden ser detectados; y respecto a otros sensores pasivos como I2, TV o visión directa, son los de mayor alcance y más nobles ante tiempo adverso, humo, etc.

IR TV

Estos equipos difieren de los TI debido a que su principio de funcionamiento es el de los clásicos TV, con la particularidad que utilizan vidicones que son sensibles a la radiación IR, conocidos como "Pyroelectric Vidicons".

A diferencia de los TI, el detector es el mismo vidicon; la ventaja que tienen sobre los TI es que no necesitan refrigeración y son más baratos; la contra es que no pueden competir con los TI en cuanto a sensibilidad y alcance.

RADAR DE APERTURA SINTÉTICA – SAR

El **SAR** (Synthetic Aperture Radar) es un sistema complejo que hace uso de diversos conceptos, todos basados en el efecto Doppler: el corrimiento en frecuencia de los ecos devueltos por un objeto cuando hay un desplazamiento relativo entre éste y el emisor.

En primer lugar, permite integrar los ecos recibidos de un mismo objeto, recurriendo a un dispositivo que puede diferenciar cada uno de los corrimientos doppler que corresponden a cada pulso sucesivo emitido.

En segundo lugar, permite discriminar un objeto móvil de su entorno, con lo que dispondrá de capacidad para presentar sólo blancos móviles (**MTI** – Mobile Target Indicator / Indicador de Blancos Móviles).

Utilizando el mismo concepto, puede discriminar dos corrimientos doppler distintos pertenecientes a un mismo objeto; por ejemplo, las orugas de un tanque en desplazamiento. Capacidad conocida como **ISAR** (Inverse SAR / Sar Inverso).

Asimismo, mediante otros algoritmos puede dividir azimutalmente el eco recibido, logrando una discriminación que es propia de antenas mucho más anchas. Esta capacidad es la que le ha dado su nombre: SAR, ya que la técnica empleada crea una **antena "virtual"** llamada **"de apertura sintética"**.

Finalmente, utilizando técnicas de interferometría, brinda información 3D. A esta técnica se la llama **IFSAR** (InterFerometric SAR / SAR interferométrico).

El Efecto Doppler

En radar se denomina así al corrimiento en frecuencia que se produce cuando hay un desplazamiento relativo entre la fuente emisora y el objeto que refleja esa emisión.

Este corrimiento es función de la frecuencia de emisión y de la componente velocidad de desplazamiento en la dirección emisor-objeto (o blanco), que será a

su vez función del ángulo que forma esta dirección con la dirección de desplazamiento real del blanco, del emisor, o de ambos.

Esto hará que ese corrimiento doppler sea máximo cuando la dirección de desplazamiento sea coincidente con la dirección emisor-blanco, y cero o nulo cuando el desplazamiento relativo es perpendicular a la dirección emisor-blanco, debido a que en este caso particular la distancia emisor-blanco no varía.

Cuando emisor y blanco se aproximan, la frecuencia de corrimiento será superior a la emitida, y será inferior cuando se alejan.

Esta componente de la velocidad relativa y el correspondiente corrimiento doppler deben ser considerados bajo tres condiciones distintas:

- Cuando el emisor está fijo y es el blanco el que se desplaza; por ejemplo en el caso de los radares terrestres de búsqueda.
- Cuando es el emisor el que se desplaza; es el caso del SAR para mapeo del terreno.
- Cuando ambos se desplazan; lo que hace que el SAR tenga capacidad para detectar blancos móviles en el terreno.

Funcionamiento del SAR

La denominación SAR se debe a que, recurriendo al desplazamiento lineal de la plataforma portadora del radar para producir el efecto doppler, se genera una antena "virtual" con una apertura horizontal varias veces mas grande que su apertura real (de ahí su nombre: apertura sintética), lo que se traduce en un haz sumamente estrecho (virtualmente) en azimuth, con su consiguiente alta resolución angular.

El SAR es la evolución lógica, consecuencia de los adelantos tecnológicos de la década 80, del **SLAR** (Side Looking Airborne Radar / Radar Aeroportado de Visión Lateral), que fuera desarrollado a fines de la década 50 y principios de la 60, y que fuera instalado inicialmente a bordo de aviones.

Para entender su funcionamiento consideremos un blanco puntual en el terreno; al hacer que la plataforma se desplace tangencialmente a él, dejándolo a un costado (por eso el nombre primitivo de Side Looking), a medida que la plataforma del SLAR/SAR avanza, el ángulo formado por la dirección de avance y la dirección emisor-blanco variará continuamente, y por tanto también lo hará la frecuencia doppler correspondiente.

Si se logran registrar las frecuencias doppler devueltas por ese blanco puntual en los sucesivos PRI (Pulse Repetition Interval / Intervalo de Repetición de Pulsos) del radar, se pueden integrar esos ecos y presentarlos en una imagen.

Haciendo lo mismo con todos los puntos próximos (elementos de resolución) del terreno, se logrará tener una imagen completa de la escena captada por el radar.

En el antiguo SLAR, la tecnología de los años 70 obligaba a que se recurriera a un tubo de rayos catódicos como elemento para impresionar una

película emulsionable (conocida como película de señal), la que a su vez servía como fuente para impresionar, a través de lentes especiales, a una segunda película, llamada película de imagen radar.

El trabajo era lento y requería un gran esfuerzo de laboratorio, y por supuesto no permitía la resolución azimutal de los SAR modernos.

En los SAR actuales todo ese embrollo de tubos y películas ha sido reemplazado por bancos de filtro de frecuencias sintonizados, que permiten discriminar las frecuencias doppler que se reciben, y por tanto los azimuth correspondientes, con lo que la resolución azimutal depende ahora de la capacidad de discriminar entre 2 frecuencias doppler próximas, independientemente de la distancia al emisor, como sucede en el radar clásico.

A esta técnica también se la suele denominar Doppler Beam Sharpening (DBS / Afinado del Haz por Doppler), ya que permite subdividir azimutalmente el eco correspondiente al ancho de haz, discriminando sus partes por sus diferentes corrimientos doppler.

Esta nueva forma de procesamiento, que es en tiempo casi real, sumada a la posibilidad de procesar gran cantidad de información a altísima velocidad, marca una notable diferencia con los SLAR. Por eso a menudo en la literatura actual a los SLAR se los suele denominar RAR (Real Aperture Radar / Radar de Apertura Real) para diferenciarlos de los actuales SAR, aún cuando todavía suele verse sus conceptos mezclados.

La resolución en la otra dimensión, en rango, se logra con técnicas de compresión de pulso, lo que presenta otro desafío, ya que la mayoría de estas técnicas usan codificación de fase para lograr la compresión.

Otro elemento a considerar es el ángulo de depresión, ya que al estar el SAR montado a bordo de un avión o satélite, los algoritmos utilizados para calcular los corrimientos doppler para cada ángulo azimutal deben ser corregidos a su vez en función del ángulo de depresión particular para cada distancia.

FRECUENCIAS

El SAR, como todo radar, permite detectar blancos terrestres oscurecidos por cubrimientos de nubes, lluvia, niebla y humo, que limitan a otros sensores de imagen como los ópticos o IR.

Además, presenta ciertas particularidades según sean sus frecuencias de operación, las que le permiten captar distintas características del terreno e incluso penetrar sus capas superiores.

Por ejemplo, las frecuencias bajas, con longitudes de onda del orden de los 65–75 cm, tienen mejor penetración en la vegetación, las corrientes aluvionales y el hielo glaciar que las frecuencias más altas, que se encuentran en el orden de 1 a 3 cm, las que por su parte son útiles para clasificar las pequeñas rugosidades de la superficie.

Esto ha llevado a que los SAR utilicen varias frecuencias para lograr la

sumatoria de virtudes que brinda cada frecuencia particular, por lo que se los encuentra en diferentes partes del espectro electromagnético, cubriendo longitudes de onda que van desde las más largas, desde los 65 -75 cm, hasta las más cortas, en el orden de los 0,3 -1 cm.

En el caso del SAR que operó a bordo del Shuttle en Feb 2000 por ejemplo, se utilizaron frecuencias relativamente bajas, denominadas "blandas" (1,25 GHz) para penetrar el suelo varios metros, con lo que se logra información útil por ejemplo para arqueología e hidrología; intermedias, conocidas como "duras"(3,75 GHz) para captar la textura del terreno; y otras superiores "muy duras" (5 GHz) para remarcar el relieve.

POLARIZACION

Si se utilizan las características particulares que brindan las polarizaciones vertical y horizontal de las antenas para transmitir y recibir, se lograrán captar diferentes características del terreno o del objeto-blanco, producto de las diferencias en la reflexión y dispersión que producen los volúmenes de la superficie e incluso los materiales de la subsuperficie.

Esto determinó que haya SAR polarimétricos, cuyas posibles combinaciones de polarización en transmisión y recepción son HH, VV, y VH/HV.

La combinación de multifrecuencias y multipolarizaciones permite hacer una clasificación de la escena píxel a píxel usando variaciones de sus improntas espectral y polarimétrica, logrando una imagen que es la de mejor resultado, sobre todo en contraste.

LOS BARRIDOS

En cuanto a las antenas, a igual que en los otros tipos de radares, estamos en un período de transición tecnológica, por lo cual hay SAR con antenas fijas, de barrido mecánico, o de barrido electrónico, lo que permite según la antena cubrimientos:

- En forma de franja o tira (**STRIP**), a lo largo del desplazamiento del sensor; suele ser denominado "Radar Referenced Coverage" (RRC / Cubrimiento con el radar como referencia).
- Por barrido de un sector (**SCAN**), en el que la antena barre varias veces un determinado sector mientras el sensor se desplaza. Denominado "Ground Referenced Coverage" (GRC / Cubrimiento con el terreno como referencia).
- Por barrido de un área puntual (**SPOT**); el sector a barrer es mínimo a fin de asegurar tanto el máximo de detalle en la imagen a obtener como, y especialmente, su visualización en tiempo real (dentro del minuto de captada la escena).

Usos

MAPEO 2D Y 3D

La nueva tecnología permitió un extraordinario desarrollo de la aplicación del SAR a otros usos además del militar, en particular todo lo atinente a la geografía terrestre.

La mayoría de ellos son fruto de mapeados topográficos que permiten:

- Caracterizar la superficie de la tierra mostrando: sus características geográficas y las construcciones hechas por el hombre.
- Determinar los recursos naturales, y realizar su planeamiento.
- Realizar apreciaciones ecológicas y ambientales.
- Efectuar estudios geológicos y análisis de deformaciones sísmicas y volcánicas.
- Realizar estudios meteorológicos.
- Seguir el desplazamiento de los glaciares y la evolución de los hielos polares.

Por supuesto, gran parte de estos usos civiles tienen su aplicación en el ámbito militar, además de los ya clásicos como monitoreo de buques, tanques, tropas, etc., y la designación de blancos, evaluación del efecto de daño, etc.

La información que se obtiene puede consistir en imágenes de dos dimensiones, o, utilizando una técnica que se llama interferometría, de tres dimensiones.

En radar existe el mismo efecto estereoscópico de la visión humana o de la fotografía, por el cual, si se observa una escena desde dos posiciones ligeramente diferentes, mediante triangulación se puede determinar la posición en las 3 dimensiones de un determinado punto de la escena.

En el caso del radar, esto se logra mediante esa técnica llamada interferometría, en la cual dos antenas receptoras separadas una cierta distancia captan el mismo eco pero con un pequeño desplazamiento en la fase de las señales recibidas.

Este tipo de SAR es conocido como **IFSAR** (InterFerometric SAR / SAR Interferométrico).

El mejor ejemplo es el SAR usado con el Shuttle, el **SRTM** (Shuttle Radar Topography Misión / Misión de topografía radar con el Shuttle) que permitió un relevamiento casi total de la superficie terrestre (entre 60° Norte y 56° Sur) con el que USA creará un modelo topográfico 3D con una precisión y resolución casi fotográficas, de 53 pies en precisión y un píxel de 30 X 30 metros.

Como es de imaginar, estas precisión y resolución tienen aplicación militar, por lo que la resolución que estará públicamente disponible será sólo de 90 X 90 metros.

Debido a la amplitud del ancho del barrido (swath) del SAR, éste tiene una

gran capacidad para relevar grandes áreas en muy poco tiempo, a diferencia de los sensores ópticos. Tomando nuevamente como ejemplo el SRTM, éste sólo tardó 11 días en realizar todo el relevamiento de la tierra. Por contraste, el procesamiento posterior tardará aproximadamente 2 años, al final de los cuales se dispondrá de un **DEM** (Digital Earth/Elevation Model / Modelo digital de la tierra) en tres dimensiones.

En el caso de mapeo con SAR a bordo de aviones, éste permite mayores resoluciones, así por ejemplo lo normal es que a 40.000 ft y con un barrido (swath) de 10 km de ancho, se pueden lograr resoluciones de 10 X 10 metros con precisiones de 3 metros en las 3 dimensiones. Sistemas más sofisticados como el del U2, tienen resoluciones y precisiones por debajo del metro.

Además de la información propia brindada por el SAR, el mapeo 3D permite mejorar notablemente lo que se conoce como "falso 3D", que consiste en extender digitalmente una fotografía sobre un modelo 3D realizado a partir de un mapa con curvas de nivel; al reemplazar estas curvas por la información del SAR 3D, se logra un modelo fotográfico 3D extraordinariamente preciso y detallado.

El procesamiento del SAR requiere algoritmos precisos, no sólo para rehacer la imagen, sino también para corregir pequeñas deformaciones, por ejemplo las producidas por la forma en que el frente de onda del haz de radar llega a la superficie terrestre en función del ángulo de depresión; o por la parcial autosupresión de la información de píxels individuales como consecuencia de la anulación entre sí de los ecos sucesivos recibidos, cuando se realiza su sumatoria.

MTI - GMTI

Cuando analizamos el efecto Doppler vimos que una de las capacidades que brindaba era la detección de blancos móviles debido al corrimiento en frecuencia que producen al desplazarse.

Con el SAR se puede utilizar esta capacidad para detectar los blancos móviles terrestres, por lo que se lo llamará **GMTI** (Ground MTI / MTI terrestre). Esta misma técnica o similares suelen también denominarse **AMTI** (Airborne MTI / MTI aeroportado) o **MGTD** (Mobile Ground Target Detector / Detector de blancos terrestres móviles).

Cuando se procura realizar detección de blancos móviles con un sensor a bordo de una plataforma que se desplaza, existen 2 corrimientos Doppler a considerar en el eco devuelto, un corrimiento producido por el desplazamiento del sensor, y otro producto del desplazamiento del blanco.

Aparentemente es sencillo discriminar entre esos dos corrimientos, bastando con suprimir el correspondiente a la plataforma del sensor para lograr detectar sólo los blancos móviles.

Pero cuando uno quiere realizar esto con un SAR se encuentra con otro problema: para cada azimut particular dentro del haz del radar corresponde un corrimiento también particular debido a la plataforma, es decir, cada píxel tendrá

su propio corrimiento, el que tendremos que determinar para poder discriminar si dentro de ese píxel hay un blanco móvil. Esto se puede hacer con algoritmos complejos y procesos que, por supuesto, son consumidores de tiempo.

Por eso normalmente se suelen usar dos modos de operación distintos en MTI, correspondiendo a dos áreas de cubrimiento diferentes:

- Uno que permite el cubrimiento de un área extensa (10.000 km² ó más), apto para detectar los blancos móviles existentes en el área.
- Otro que cubre sólo un sector reducido (20 a 50 km²) para poder examinar en detalle la zona de los blancos móviles y discriminarlos, por ejemplo, vehículo por vehículo dentro de un convoy, e incluso en algunos casos, identificarlos y utilizar la información para atacarlos.

Asimismo, hasta ahora la tecnología actual no permite operar simultáneamente en modos SAR (mapeo) y MTI (detección de blancos móviles), ni tan siquiera el JSTARS E8-C, el más poderoso de los sistemas de procesamiento actuales.

Esto a veces presta a confusión, pues se ha producido una pequeña anarquía, en donde a todos los radares que detectan algo sobre la superficie terrestre se los denomina SAR, cuando en la realidad sólo unos pocos tienen la real capacidad SAR, menos aún la posibilidad de presentar SAR y MTI simultáneamente.

Al respecto el JSTARS se aproxima a este objetivo; recurre a un procedimiento en el que primero busca los blancos móviles por MTI, una vez detectados, pasa al SAR en modo SPOT (sector puntual) en el área de interés donde están los blancos, y alterna los modos MTI y SAR, con lo que logra una imagen integrada de ambos, superponiendo la información obtenida secuencialmente con pocos segundos de diferencia.

ISAR

Si se logra distinguir entre pequeñas diferencias en las frecuencias de corrimiento Doppler, se pueden discriminar los diferentes corrimientos que están presentes dentro de un mismo blanco móvil; el ejemplo clásico es el que ya mencionamos de un tanque, en donde es posible distinguir entre el corrimiento producto del desplazamiento del tanque en sí, y el corrimiento producido por las orugas, que tienen una velocidad de desplazamiento diferente.

Esta capacidad, aún en desarrollo, permitirá identificar, o al menos clasificar por tipo, a los blancos móviles detectados, pudiendo distinguir por ejemplo un vehículo de orugas de uno con ruedas.

Esta técnica es conocida como **ISAR** (Inverse SAR / SAR Inverso) debido a que el SAR en este caso no utiliza los corrimientos producidos por el desplazamiento de la plataforma del sensor, sino los corrimientos correspondientes al blanco.

Por supuesto hay grandes especulaciones con las posibilidades de identificación que esta técnica brinda, asumiendo que podrá identificar tanques

por su particular velocidad relativa tanque-oruga, y hacer lo mismo con los aviones y helicópteros por el Doppler particular de sus hélices o álabes de turbina, etc.

Aplicaciones Militares

Desde ya, la primera aplicación es la disponibilidad de mapas con información 3D sumamente precisa, así como la posibilidad de elaborar modelos en tres dimensiones.

Y como antes mencionamos, todos los usos civiles tienen su aplicación en el ámbito militar; por ejemplo, una vez obtenida la imagen de un área determinada, se puede detectar fácilmente si hubo cambios en la escena por simple comparación con otra imagen obtenida después de un tiempo determinado.

Así como el SAR permite estudiar el desplazamiento de glaciares o los cambios por actividad volcánica, también permite detectar los cambios hechos por el hombre en una escena en particular, y en el caso militar específicamente, por ejemplo se pueden detectar nuevas construcciones subterráneas por el movimiento de tierras o por la variación de la forma del terreno.

Esta comparación de imágenes digitalizadas tomadas con un cierto intervalo es la solución a uno de los mayores problemas de la inteligencia militar: el tiempo que demanda el análisis de las imágenes, ya que por la simple comparación digital, resaltan inmediatamente las diferencias, y así el analista se debe dedicar sólo a éstas. Aunque nunca debemos menospreciar la habilidad e ingenio de nuestro oponente para ocultarse.

Cuando el análisis se efectúa sobre imágenes MTI, la información se puede comprimir en el tiempo, de forma que se visualice en pocos minutos el movimiento producido durante varias horas; o ver en 15 segundos lo que pasó en la última hora en un determinado lugar.

Esto permite apreciar los desplazamientos y maniobras, permite ver la batalla y evitar que las fuerzas empeñadas sean sorprendidas por refuerzos o rodeadas; permite que las fuerzas terrestres avancen rápidamente cuando saben que no tienen nada delante que los pueda sorprender, y les permite ir directamente al lugar de empeño.

Volviendo a la imagen SAR, la tecnología actual todavía demanda demasiado tiempo para su procesamiento, por eso como ya dijimos, el procedimiento utilizado para la localización y ataque a blancos terrestres recurre primero al MTI para detectar el blanco, pasando luego al SAR en modo Spot para identificar al blanco en su entorno y así apreciar la real situación.

Por ejemplo, en la guerra del Golfo el JSTARS en modo MTI mostró movimiento de vehículos cruzando un río a pesar de que los puentes habían sido destruidos, pasando al SAR en modo Spot, se visualizó que habían construido un puente de pontones junto al destruido.

Otras capacidades: al detectar de donde salen los blancos móviles se puede

detectar el lugar donde se ocultan; marcando el lugar donde desaparecen se puede determinar donde se están concentrando las fuerzas. Un trabajo parecido, salvando las diferencias, se hizo durante la guerra de Malvinas: localizando con el radar TPS-43 donde desaparecían los helicópteros se localizaban los lugares de reunión de las fuerzas inglesas, y hacia estos puntos se guiaba a los Canberra para el bombardeo.

Igualmente da un extraordinario preaviso de la actividad aérea enemiga, ya que así como detecta vehículos en el terreno, también los detecta dentro de las Bases Aéreas, no sólo a los vehículos, cuyo movimiento da una idea de la actividad, sino también a los aviones que se desplazan, especialmente cuando ruedan hacia cabecera, con lo que se obtiene información del futuro movimiento aéreo antes que los aviones decolen.

Las Plataformas

El SAR necesita una plataforma que le brinde una adecuada posición relativa respecto a la escena a detectar y que sea muy estable; y en adición a ello normalmente necesita un soft para compensar los movimientos no deseados de la plataforma durante el intervalo de repetición de pulsos (PRI).

Hasta ahora las plataformas son aéreas o satélites, aunque hay algunos desarrollos para vehículos terrestres y buques. En el caso de plataformas aéreas, la mayoría tiene sus antenas colocadas de forma que brindan una buena visión lateral, para poder utilizar adecuadamente el efecto Doppler; no obstante, el SAR puede ser instalado en la trompa a bordo de aviones de combate, o ser uno de los modos de operación de este tipo de radares, con la salvedad que, con la tecnología actual, no puede ser aplicado a blancos que se encuentran directamente al frente en una apertura de aproximadamente 15° a cada lado, por eso se suele decir que este tipo de SAR es ciego directamente al frente.

Asimismo, la miniaturización ha permitido que incluso se pueda disponer de SAR montados en pods.

SENSOR DE IMAGEN POR LASER Y FRECUENCIAS MILIMETRICAS

Aún cuando la tecnología lo permite y se han realizado distintos desarrollos y prototipos, a nivel internacional no se han desplegado operativamente sistemas sensores de imagen basados en láser o en radares milimétricos (al menos no son de público conocimiento), entre otros motivos porque sus capacidades actuales, en especial rangos, son similares a las obtenidas con sensores pasivos en frecuencias ópticas e IR.

PARTE III

LOS SENSORES DE SEÑAL

CONCEPTOS PREVIOS

Señal

Bajo la denominación "señal" consideraremos todo tipo de emisiones, cualquiera sea la parte del eem en que se produzcan; pudiendo ser generadas por el elemento o dispositivo a detectar, al que denominaremos **blanco**, o reflejadas por él.

Apartándonos de la clasificación clásica que se hace de la Guerra Electrónica, también consideraremos como señales todas las emisiones de comunicaciones, ignorando su contenido o información transmitida; contenido que consideraremos después bajo el título "Sensores de Contenido".

Es decir que arbitrariamente separaremos, a los efectos del análisis, a los sensores COMINT: en aquellos que miden la emisión y sus parámetros, y en los que recuperan y descifran el contenido.

Los Sensores Según los Parámetros que Detectan

Podemos agrupar arbitrariamente a los sensores en aquellos que detectan:

- Sólo la **presencia** de una emisión dentro de su campo visual, sin ninguna referencia de distancia o posición relativa. Ejemplo: un sensor IR que capta el fogonazo del lanzamiento de un misil.
- **Distancia**, debiendo ser apuntado, o al menos orientado para que el blanco quede dentro de su campo visual. Ejemplo: un "laser rangefinder" (medidor de distancia láser).
- Una **posición angular** relativa respecto al eje del sensor. Ejemplo: un "seeker" (perseguidor / cabeza buscadora de un misil).
Esta posición angular relativa estará formada por una dirección rotacional (arriba, abajo, izquierda, derecha, y todas las posiciones intermedias), normalmente medidas en grados (360°); y una determinada apertura angular respecto al eje del sensor, medida también en grados o en mils.
- Una **triangulación**; Utilizando dos mediciones separadas (dirección de arribo) de la señal para localizar espacialmente al emisor.
- **Posición angular y distancia**, con lo que determinan la ubicación espacial relativa del blanco. Ejemplo: un radar de búsqueda.

Tracker y Seeker

A veces estos conceptos se mezclan, ya que los dos dispositivos son similares y se basan en el mismo procedimiento: la determinación de la posición angular relativa del blanco respecto al eje del sensor.

Los usos y costumbres han llamado "tracker" (seguidor) al sensor montado en un sistema de armas y que permite realizar el apuntado continuo del blanco; y denominado "seeker" (perseguidor / buscador) al dispositivo instalado en la proa de la munición guiada o misiles, y utilizado para su guiado.

Targeting (asignación-marcación de blancos)

Al conjunto de sensores necesarios para detectar y localizar un blanco, y para designarlo como tal, se lo denomina "targeting system" (sistema de asignación de blanco).

Estará conformado por un sensor para la detección y localización (Ej.: FLIR), otro sensor para su completa ubicación espacial (Ej.: laser rangefinder – medidor de distancia láser), y recurrirá a algún dispositivo para la designación del blanco y su iluminación continua (Ej.: laser designator – designador láser), lo que permitirá que otro sensor (Ej.: laser seeker – perseguidor láser) realice el guiado de la munición.

Activo, Semiactivo y Pasivo

Se suele hacer una clasificación de la forma en que operan los sensores según lo que utilicen como fuente emisora de señal.

SENSORES ACTIVOS

Son aquellos que utilizan un emisor propio montado en la misma plataforma que el sensor y coalineado con él, para que ilumine al blanco y así su reflejo sea captado por el sensor. Ejemplo: un radar de seguimiento.

SENSORES SEMIACTIVOS

Son en realidad sensores pasivos, ya que no emiten, pero necesitan que el usuario del sensor posea un emisor instalado en otro lugar o plataforma (no la misma del sensor), próximo al blanco y en una posición adecuada para que lo ilumine, de forma que el sensor pueda captar el reflejo. Ejemplo: las bombas de guiado láser.

Cabe aclarar que el sensor en sí es completamente pasivo, y por lo tanto el enemigo no puede detectar su presencia, pero necesita un iluminador / marcador / designador próximo, que sí será detectado por el enemigo, y por lo tanto lo alertará de la posible amenaza.

Y cabe otra aclaración; muchas veces se ilumina al enemigo sólo para que éste reaccione, aún cuando no hay intención de atacarlo, sea porque está fuera del alcance de las armas, sea por otras razones tácticas o técnicas. Ejemplo: Durante la guerra de Malvinas los Harrier enganchaban su radar sobre los Mirage que regresaban al continente, aún cuando estaban fuera del alcance de sus armas, con la esperanza que el piloto argentino, al ver la amenaza en su RWS (Radar Warning System – sistema de alerta radar), acelerara para escapar, consumiese más combustible, y por tanto no llegase al continente.

SENSORES PASIVOS

Son aquellos que: o captan directamente una emisión propia del blanco (Ej.: los misiles IR como el Sidewinder), o captan el reflejo que produce el blanco de una fuente emisora que no es operada por el usuario del sensor, y esta fuente puede ser natural o artificial (Ej.: un sensor óptico, que capta la imagen que produce el reflejo de la luz solar sobre el blanco).

La Localización del Blanco

Vimos que en los sensores de imagen se procura que el píxel (la celda de resolución espacial) sea lo más pequeña posible para lograr mayor definición de la imagen; esto requiere sistemas y procesamientos complejos, y normalmente consumo de tiempo.

Cuando lo que se busca es sólo detectar la presencia y ubicación del blanco; como es el caso de los sensores de señal, se puede recurrir a sistemas más simples y rápidos, ya que lo que se requiere de las celdas de resolución espacial no es la formación de una imagen, sino que se busca que sean sólo lo suficientemente chicas como para satisfacer la precisión angular que se necesita según el uso que se le dé al sensor.

Estas celdas de resolución espacial (ángulo volumétrico) en que será dividido el campo visual (FOV) del sensor, si son sensadas por un detector adecuado determinarán la posición angular relativa del blanco al captar la presencia de señal en una celda (o grupo próximo) en particular.

A similitud de lo que ya vimos cuando describimos el IRLS al considerar los sensores de imagen, este sensado podrá ser hecho por:

- Un único detector que realizará un barrido particular que le permita determinar la posición angular relativa del blanco.
- Una ristra o tira (string) de detectores y el correspondiente barrido para localizar al blanco.
- Una estructura focal planar (FPA – Focal Plane Array) en donde no se requiere barrido (es un sensor "staring") ya que el FPA cubre completamente el FOV.

PASIVOS Y ACTIVOS

A continuación se han tratado de plasmar todos los sensores que se basan en la captación de una señal para operar.

Como vemos, se los ha agrupado en pasivos y activos para facilitar su interpretación, pero debemos recordar lo que recién expresamos sobre activos, pasivos y semiactivos.

Al hacer más abajo su descripción, nuevamente se los ha vuelto a agrupar, esta vez según la parte del espectro que utilizan.

Sensores de Señal, PASIVOS

Comprenden los siguientes sensores:

- **IR – que operan en frecuencias del infrarrojo**
 - IRST (IR Search and Track – búsqueda y seguimiento IR)
 - Seeker (perseguidor)
 - Tracker (seguidor)
 - Detector de misiles balísticos
 - Detector del fogonazo de armas.
 - MWS/IRWR (missile warning system / sistema de alerta de misiles) / (IR warning receiver / receptor de alerta IR)
- **Laser**
 - Seeker (perseguidor)
 - Spot tracker (seguidor del punto láser)
 - LWS (laser warning system / sistema de alerta láser)
- **UV – que operan en frecuencias del ultravioleta**
 - MWS (missile warning system / sistema de alerta de misil)
- **mm – que operan en frecuencias milimétricas**
 - Radiómetro
- **SIGINT – signal intelligence / inteligencia de señales – INTEM – inteligencia de emisiones**
 - ELINT – electronic intelligence / INTEL – inteligencia electrónica
 - COMINT – communications intelligence / INCOM – inteligencia de comunicaciones (considerando el sentido de las comunicaciones sólo como señales transmitidas).
 - ESM – electronic support measures / MAE – medidas de apoyo electrónico
 - RWR – radar warnig receiver / RAR – receptor de alerta radar
 - XXXINT (todos los demás INT en los que arbitrariamente se suele agrupar al análisis de señales, ej.: MASINT, URINT, etc.)

Sensores de Señal, ACTIVOS

- **Láser**
 - LADAR/LIDAR – laser radar
 - Range Finder (medidor de distancia)
 - ALS (active laser seeker / perseguidor láser activo)
 - Tracker (seguidor)
 - Chemical detector (detector de agentes químicos)
 - Mapping (mapeado)
- **Radar Milimétrico**
- **UWB Radar** (Ultra WideBand Radar / radar de banda ultra ancha)
- **Radar**

En todas sus variantes:

 - aéreos, terrestres, navales y satelitales
 - de pulso, onda continua y doppler pulsado.
 - de búsqueda, seguimiento, etc.

SENSORES IR

Los sensores de señal que trabajan en la parte IR del eem se basan en el alto contraste de la radiación del blanco respecto a la correspondiente a su entorno; por eso la mayoría de estos sensores son utilizados contra blancos aéreos o blancos navales; por su gran diferencia de radiación contra el cielo o el agua.

Su gran ventaja sobre los otros sensores es que son completamente pasivos, y que los blancos poco pueden hacer (salvo por diseño) para evitar emitir y por tanto ser detectados.

IR Search and Track

El **IRST** (IR Search and Track / búsqueda y seguimiento IR) es utilizado para la vigilancia pasiva de una zona o sector en reemplazo de los radares, que son activos y por tanto detectables.

Esto se debe a que los sistemas de armas (aviones por ejemplo) deben ser lo más furtivos (stealth) posible si quieren sobrevivir; y esto no sólo se refiere a su eco radar, sino que no tienen que emitir por ningún motivo para no ser detectados.

Por lo tanto deben recurrir en lo posible a sensores pasivos.

Esta es una alternativa para que el atacado no detecte que está siendo seguido, pues si se usa el radar, el blanco lo detectará con su RWS y realizará maniobras evasivas aún antes que el atacante tenga una buena señal en su radar o esté en distancia de tiro.

El objetivo es siempre el mismo, no dar tiempo al CR del enemigo.

Por suerte la tecnología actual ya permite que los IRST instalados en aviones para intercepción aérea (MiG 29 por ejemplo) tengan un alcance acorde con los

misiles que utilizan.

El IRST siempre es complementario del radar de abordaje, o es utilizado con un medidor de distancia, ya que ésta es una información importante que no puede brindar. Por sus frecuencias de operación provee una mejor resolución que el radar, aunque se ve limitado por la presencia de niebla, ya que el tamaño de las partículas de ésta coinciden con las longitudes de onda del IR.

El IRST tiene también muy buena aplicación a bordo de buques, sobre todo para detectar a los misiles antibuque a ras del agua (sea skimming), ya que detectan la radiación IR producida por el rozamiento aerodinámico del misil, y al ser pasivos no permiten que el misil haga el homming sobre una emisión como es el caso si el buque usara radares para detectarlo.

También es usado, por el mismo motivo, por la defensa aérea contra blancos aéreos próximos y a muy baja cota, como los helicópteros y los VeNTri (Vehículos No Tripulados).

Hace unas décadas, los primeros sensores IR eran fáciles de confundir, pero la tecnología de los últimos años ha permitido que posean una adecuada resolución espectral, que les posibilita discriminar claramente al blanco de su entorno, distinguir entre un blanco y un señuelo o una IRCM (contra medida IR), e incluso, diseñados en base a un adecuado análisis espectrográfico de los posibles blancos, identificarlos, o al menos agruparlos por tipo.

IR Tracker y Seeker

Ambos sistemas, el **tracker** (seguidor) y el **seeker** (perseguidor) se basan en el mismo principio que el IRST: la localización angular de un blanco; por supuesto que con campos visuales mucho más estrechos.

En el caso del tracker, la información comanda automáticamente al dispositivo en que está montado el sensor para mantener al blanco continuamente apuntado, y al mismo tiempo brinda información al operador de la plataforma portadora para su gobierno.

El apuntado permanente permite la designación del blanco y el lanzamiento de las armas.

El seeker en cambio, montado en la proa de la munición a la que guiará, utiliza la información angular respecto a su eje para realizar el homming sobre la señal que capta, comandando las aletas de la munición.

IR Localizador de Artillería y Misiles Balísticos

Basado en los mismos principios que recién vimos, la intensidad de radiación IR que produce el fogonazo del disparo de la artillería de campaña o el lanzamiento de un misil balístico, permite detectarlo y localizar su emplazamiento. Para ello el sensor debe estar montado en una plataforma aérea lo suficientemente elevada o a bordo de un satélite.

En el caso de los misiles balísticos, el sensor IR puede también seguir la cola de gases del misil, y por tanto determinar su trayectoria y posible lugar de impacto.

IR Warning Receiver

El **IRWR** (IR Warning Receiver / receptor de alerta IR) es utilizado para detectar las emisiones IR producidas por las posibles amenazas a la plataforma portadora.

Como esta amenaza es normalmente un misil, del cual detecta su cola de gases o la radiación producida por el calentamiento de su superficie al rozar con el aire, se lo denomina también **MWS** (Missile Warning System / sistema de alerta de misil).

Cabe aquí aclarar que estas siglas **MWS** también suelen ser utilizadas para hacer referencia al Multi Warning System (sistema de alerta múltiple), que comprende a un conjunto de sensores para alerta, formado por un Radar WS más un Láser WS más el Missile WS, sea éste basado en IR o en UV.

SENSORES LASER

En el caso de los sensores láser, éstos pueden ser de los tres tipos: activos, semiactivos y pasivos.

Ladar/Lidar

Es un radar basado en técnicas láser, de ahí su designación **LADAR** (Laser Detection And Ranging), a veces también designado **LIDAR** (Light Detection And Ranging).

Por sus características, su haz es sumamente estrecho, y por tanto con muy buena precisión angular, a lo que se suma que no necesita "antenas" de gran apertura para lograrlo, como en el caso de los radares; por lo que resulta un elemento muy útil cuando se dispone de muy poco espacio frontal para su instalación.

A diferencia del radar, su aplicación se ve restringida por su alcance y porque su haz estrecho significa FOV pequeños o grandes tiempos de barrido. En algunos casos, su corto alcance y haz estrecho significan una ventaja.

Laser Range Finder

Es la aplicación más conocida del LADAR, normalmente está ligado a otros sensores que no pueden medir distancia para complementarlos, por ejemplo el FLIR en los sistemas de armas aéreas.

En esta configuración, como su nombre lo indica, no mide posición angular, sólo distancia.

Laser Locator

Con este término existe una pequeña anarquía, ya que lo suelen utilizar con dos definiciones completamente distintas.

Para algunos, es un LADAR que utiliza sus capacidades para medir una posición angular y una distancia, y así establecer la localización de un blanco, en forma similar a como lo hace un radar.

Para otros, es un LWS que posee la capacidad para determinar la dirección de arribo de la señal, permitiendo su localización. Se lo suele utilizar junto con el Laser Spot Tracker.

Laser Seeker

Es el detector colocado en la proa de la munición guiada y los misiles, que puede determinar la dirección de arribo de una señal láser, y realizar el homming sobre la misma.

El seeker puede ser activo o semiactivo. El activo suele ser identificado por las siglas **ALS** (active laser seeker / perseguidor láser activo) utilizando un LADAR con barrido cónico.

El semiactivo necesita un emisor colocado en la plataforma lanzadora u otra próxima para que ilumine el blanco. Ejemplo: el seeker de una bomba guiada que capta el reflejo de un "laser designator" operado por un infante situado en proximidades del blanco.

Para evitar que el seeker sea engañado o confundido con otras emisiones láser, normalmente el designador emite una señal codificada.

Laser Spot Tracker

Es similar al seeker, pero en lugar de estar montado en una munición, lo está a bordo de una plataforma, que puede ser tripulada o no, y que permite la detección y localización pasiva de un blanco o elemento de referencia que le marca un designador láser externo.

Sirve para transferir un blanco de una plataforma a otra.

Laser Warning System

El **LWS** (laser warning system / sistema de alerta láser) cumple la misma función que un RWS pero en las longitudes de onda en que operan los láser, para alertar a la tripulación en caso que detecte cualquier emisión que ilumina a la plataforma y que puede constituir una amenaza.

El auge que últimamente ha tenido la munición guiada contra blancos terrestres ha producido una gran demanda de LWS para instalación tanto en vehículos acorazados como de otros tipos.

SENSORES UV

Cuando el misil amenaza es de guiado pasivo (ej.: IR) hay tres formas de detectar su presencia: verlo; utilizar un radar para captar su eco; o captar alguna emisión involuntaria que produzca el misil; estas emisiones involuntarias se encuentran en dos bandas del espectro, la IR y la UV.

El sensor que opera en UV capta las radiaciones producidas en las longitudes de onda de $0,2 \mu$ a $0,3 \mu$, conocidas como de "ceguera solar" (solar blind).

Aunque existen diversos desarrollos y prototipos para lograr una presentación por imagen, su mayor aplicación es como alertador de la presencia de un misil (MWS) al detectar las emisiones UV de la cola de gases.

En esta función compite con los detectores IR con ventajas y desventajas, ya que es menos vulnerable a las falsas alarmas producidas por elementos calientes en la superficie terrestre, pero es inferior al IR para detectar misiles aire-aire a altas cotas, debido a que el ozono atenúa las radiaciones UV de la cola de gases.

Como también compite como sensor con el radar milimétrico, para entender sus pros y contras es conveniente recordar que la propagación en las bandas UV, IR y mm (a igual que en la parte óptica), está muy relacionada con el tamaño de las partículas suspendidas en el ambiente, como las de niebla, lluvia, humo, etc., y por tanto, según sea su tamaño en relación con la longitud de onda del sensor, afectará más o menos a éste, al hacer que la radiación sea absorbida o dispersada.

Recordemos que los sensores en UV operan en $0,2$ a $0,3 \mu$, los IR operan en 3 a 14μ , y los milimétricos en 1.000 a 3.000μ .

SENSORES EN FRECUENCIAS MILIMETRICAS

En las frecuencias milimétricas encontramos dos tipos de sensores, uno activo: el radar milimétrico, y otro pasivo: el radiómetro.

La región milimétrica del espectro cubre de 30 a 300 GHz (10 a 1 mm). Como ya vimos, estas longitudes de onda coinciden con las dimensiones físicas de algunas partículas en suspensión en la atmósfera, sobre todo agua y anhídrido carbónico, lo que hace que existan bandas de frecuencia de mayor o menor absorción o dispersión de las radiaciones, presentando grandes restricciones a la transmisión.

Esto genera las llamadas ventanas de propagación, que comprenden: $39,5$ a $51,4$ GHz, 66 a 105 GHz, 134 a 170 GHz, y 190 a 275 GHz.

Fuera de estas ventanas la emisión se atenúa rápidamente con la distancia, y por lo tanto afecta notablemente al alcance de los sensores; en algunos casos esta característica, en lugar de ser una limitación es en realidad una ventaja, ya que asegura que, debido a su limitada propagación, el enemigo no podrá detectar la señal más allá de la distancia útil del equipamiento.

Radar Milimétrico

Aún cuando los radares milimétricos se ven limitados por las condiciones de tiempo adverso cuando se los compara con los sistemas que operan en bandas de microondas (centimétricas), tienen mayores características de resolución que éstos, y son típicamente más pequeños.

Si se los compara con los sensores que operan en las frecuencias más altas de las regiones IR y óptica, no tienen las muy buenas resoluciones de éstos, pero tienen mejores características de propagación a través de humo, bruma, polvo y niebla.

Poseyendo características de ambas regiones, la de microondas y la óptica, los radares milimétricos integran las ventajas de ambas, de forma de reducir o minimizar sus limitaciones o desventajas.

Debido a sus frecuencias de operación muy altas, se pueden lograr antenas de mucha ganancia, altamente direccionales, por lo que tienen una muy buena discriminación entre dos blancos muy próximos.

La alta frecuencia permite asimismo que pulsos de pocos picosegundos contengan los ciclos suficientes como para usarlo como doppler pulsado, a la vez que brinda una muy buena resolución (1 psec – picosegundo - equivale a una distancia de 0,15 mm).

Además de su aplicación para la asignación de blancos (ej.: misiles aire-superficie para helicópteros), esta alta resolución lo hace apto como sensor para evitar obstáculos, sobre todo en helicópteros, ya que por ejemplo permite distinguir la presencia de cables de alta tensión a 2 km.

Radiómetro Milimétrico

Estos equipos miden la energía termodinámica de la atmósfera que es emitida / reflejada por la superficie terrestre y los objetos sobre ella.

Esta energía termodinámica es distinta de la energía térmica IR, y a diferencia de ésta, no guarda relación con la temperatura de los objetos.

El radiómetro puede ser comparado con un radar biestático, en donde el transmisor es el cielo.

Aprovecha la particularidad que la superficie del agua y los objetos metálicos, como tanques, aviones, misiles de crucero, etc., presentan características de reflexión de la energía termodinámica muy bajas en frecuencias milimétricas.

Lo que hace que, al reflejar las temperaturas (radiométricamente) frías del cielo, sean fácilmente detectables por su contraste con el entorno más caliente de la superficie terrestre.

Esto es debido a que en las frecuencias milimétricas, la mayor parte de los componentes de la superficie terrestre (suelo, pasto, follaje) son emisivos antes que reflectivos, teniendo por lo tanto temperaturas radiométricas que son

independientes de la del cielo, de la que si dependen los objetos metálicos, que son reflectivos antes que emisivos.

Ello permite detectar pequeños vehículos aéreos, tales como los misiles de crucero, a baja cota, o captar a los aviones del tipo furtivo (stealth), ya que la detección se realiza desde arriba por contraste con el terreno; lo que constituye una solución para las defensas aéreas, que tienen limitaciones para detectar este tipo de blancos con medios más convencionales como los radares.

Ya vimos que comparados con los sistemas también convencionales en IR y ópticos, los sensores mm pueden captar información aún en condiciones de nubosidad o bruma, y polvo o humo del campo de batalla.

El inconveniente que presentan es la plataforma portadora, ya que ésta debe ser un avión o un VeNTri operando a altas cotas, o un satélite, colocados en una posición adecuada que permita captar las reflexiones termodinámicas atmosféricas que los objetos producen.

Una de las primeras aplicaciones operativas ha sido como sensores de la munición antitanque que los ataca desde arriba, aprovechando justamente el contraste radiométrico entre el tanque y su entorno.

RADARES

Existe una extraordinaria variedad de radares con aplicaciones de las más diversas, tanto en el ambiente militar como en el civil y el científico, por lo que resulta sumamente difícil tratar de realizar un análisis completo que sea breve, y sobre todo digerible.

Por eso a continuación, aún cuando todos los radares se basan en los mismos principios, hemos realizado una clasificación completamente arbitraria, como se ha hecho en otros casos del presente trabajo, para agruparlos tomando su aplicación o función como base, y así poder analizarlos.

Los agruparemos en aquellos:

- Para sistemas de armas contra blancos:
 - Aéreos.
 - Navales.
 - Terrestres.
 - Misiles balísticos.
- Para búsqueda y vigilancia de blancos:
 - Aéreos.
 - Terrestres.
 - Marítimos.
 - Satélites.
 - Misiles balísticos.
- Terrestres para ayuda al tránsito:
 - Aéreo.
 - Marítimo.

- Abordo de plataformas para su navegación.
- Otros para:
 - Penetración de superficies.
 - Espoletas de proximidad.
- Biestáticos.
- De banda ultra ancha (UWB).
- Milimétricos.

Sobre esa base intentaremos una aproximación al tema, sin entrar en detalles, ya que esto haría que los conceptos se tornaran complejos y el trabajo voluminoso. No obstante, aunque no se traten aquí, los detalles son sumamente importantes, ya que si no se conocen en profundidad las particularidades de las distintas emisiones, puede suceder que se confunda un inocente radar de uso civil con una amenaza; y su contraparte, un radar amenaza puede simularse para que sea tomado como una inocente emisión civil. Además de no saber como degradarlo o como protegerlo.

Algunos de los radares que describiremos ya se han ido, o se están yendo de los inventarios de la mayoría de los países, pero lo mismo los hemos colocado aunque sólo sea como referencia transitoria.

Tratando de hacer en pocos párrafos el mejor análisis posible, lo iniciaremos considerando que todo radar está compuesto por dos grupos o conjuntos más o menos definidos: el formado por el **transmisor** y el **receptor** (TxRx) y el conjunto **antena**; mereciendo una consideración particular las antenas activas, ya que éstas tienen incorporados transmisores o receptores discretos en su estructura.

Como sabemos, el radar se basa en que la energía que irradia es reflejada por un blanco. La posición espacial de ese blanco la sabremos mediante dos posiciones angulares relativas (azimut y elevación) dadas por la antena; y dependerá de la forma en que sea modulada la energía radiada para que obtengamos la tercera información de posición: la distancia, o en cambio, sólo información de velocidad.

Conjunto Transmisor-Receptor (Tx-Rx)

En su diseño intervienen distintos factores a definir, que determinarán su función o aplicación, tales como potencias, sensibilidades, bandas de frecuencia, anchos de banda, etc.

Absteniéndonos por ahora de considerar las funciones, podemos dedicarnos a hacer un primer análisis que define o clasifica a los radares según las características de modulación de la energía radiada.

Esto nos permite hablar de radares:

- De onda continua o "CW" (continuous wave), a los que podemos subdividir en:
 - Onda continua pura
 - Doppler básico

- Doppler modulado en frecuencia o "FMCW"
- De **pulso**.
- **Doppler pulsado** (pulsed doppler).

ONDA CONTINUA PURA

Cuando el radar no tiene modulación alguna, cuando es **CW** (continuous wave) pura, es poca la inteligencia que brinda; si la energía es devuelta por un blanco, sólo nos dirá que hay un blanco, pero no nos dará ninguna otra información.

Son los radares más simples, pero no obstante son útiles, ya que por ejemplo: conectados a una antena de haz suficientemente estrecho, servirán para marcar un blanco; y los encontramos en los sistemas de armas como "**radar illuminator**" (iluminador radar), cumpliendo las mismas funciones que un marcador laser.

También sobre esta base pueden cumplir la función de guiado de misiles, los que lanzados dentro de su haz, constituyen los misiles del tipo "**haz cabalgado**", que se mantendrán dentro del haz dirigiéndose al punto (blanco) iluminado por el radar.

Otra alternativa de uso es el guiado de un misil "**semiactivo**", el que en lugar de montarse sobre el haz emitido por el radar, se guiará, y apuntará, hacia la fuente (el blanco apuntado) que refleja la energía radiada.

En todos estos casos, el radar en sí no necesita tener un receptor, ya que éste estará abordo del misil o de cualquier otro elemento que utilice la energía para guiarse, sea ésta la transmitida, o la reflejada por el blanco.

Si se quiere tener la certeza que el radar está apuntando correctamente, entonces sí se recurre a un receptor en el radar, montado junto al transmisor, y que nos indicará, por el eco recibido, que está siendo apuntado correctamente. Como la transmisión es continua, el receptor necesitará una segunda antena montada junto a la del transmisor.

Si a la parte receptora le adaptamos un dispositivo, por ejemplo una antena de barrido cónico, como veremos más adelante, podremos saber si el radar está perfectamente centrado en el blanco o si está desplazado; esto nos permitirá agregarle otros dispositivos adecuados con los que podremos hacer que el radar se autocentre automáticamente sobre el blanco, y lo siga.

DOPPLER BASICO

Cuando la plataforma en la que está montado el radar de CW se mueve, o se mueve el blanco que refleja la energía, o se mueven ambos, se produce un efecto físico conocido como "**corrimiento doppler**".

En una explicación simple, aunque no cierta, es como si las ondas sinusoidales que conforman la energía que se desplaza, se comprimiesen cuando transmisor y receptor se acercan entre sí, y se expandiesen cuando transmisor y

receptor se alejan.

Esto hace que se produzca un corrimiento (doppler) en la frecuencia que se recibe, aumentando la frecuencia al acercarse (compresión de la longitud de la sinusoide - λ), y disminuyendo la frecuencia al alejarse (alargamiento de la sinusoide - λ).

La magnitud de este corrimiento de frecuencia es proporcional a la velocidad relativa a la que se desplaza un objeto, sea éste el transmisor, el objeto reflejante, el receptor, o los tres; lo que permite determinar velocidades con precisión a partir de ese corrimiento.

En su versión más simple, sirve como detector de movimientos en sistemas de seguridad de instalaciones, y su presentación es una simple luz o un par de auriculares.

Esta capacidad para determinar velocidades ha permitido múltiples desarrollos, como el SAR; y un sinnúmero de aplicaciones.

Por ejemplo, en el campo de las armas, permite realizar los cálculos de trayectorias, sea para apuntar los cañones, sea para calcular la intercepción con misiles; tiene aplicación en las espoletas de proximidad; y también, este mismo efecto doppler es el que permitió la creación de una CCME, la "velocity gate" (compuerta o ventana de velocidad) para evitar el desvío del misil por señuelos o chaff.

DOPPLER MODULADO EN FRECUENCIA

Comúnmente es conocido como **FMCW** (Frequency Modulated Continuous Wave / onda continua modulada en frecuencia).

El efecto doppler permite determinar velocidades pero no distancias; una opción para poder hacerlo fue modular en frecuencia a la onda continua que se transmite, lo que produce una variación continua y normalmente lineal de la frecuencia que se emite, recurriendo a una modulación en frecuencia de forma triangular o diente de sierra.

Como el desplazamiento es continuo y constante en el tiempo, basta con comparar la magnitud del desplazamiento en frecuencias de la señal recibida con la que se está transmitiendo en ese instante para saber la distancia a la que se encuentra el blanco que produjo el eco.

Este tipo de radares, utilizando la antena adecuada, permite conocer la posición espacial precisa del blanco, así como su dirección de avance y su velocidad.

Por supuesto que es sofisticado, ya que utiliza dos desplazamientos de frecuencia, el de la FM para medir distancias, y el corrimiento doppler que indica velocidad.

Recién en los últimos años la tecnología permitió disponer de circuitos de procesamiento con la capacidad para distinguir los dos tipos de desplazamiento.

DE PULSO

Basa su funcionamiento en la modulación por amplitud, transmitiendo un pulso con la suficiente energía como para recibir un eco devuelto por un blanco determinado (cuyo tamaño es definido en "superficie radar equivalente" o RCS – radar cross section, y medido en m^2), a una distancia también determinada.

Estos radares permiten, utilizando la antena adecuada, determinar la precisa localización espacial de los blancos.

Hasta la década 70, la energía a transmitir estaba constituida por un pulso con una amplitud (potencia pico) lo más alta posible, y una duración (tiempo de transmisión) lo más corto posible; basados en el concepto que permitía la tecnología del momento: mayor potencia pico significaba mayor alcance, y mientras más corto el pulso mayor era la discriminación.

Esto era así porque si se aumentaba la duración del pulso para tener más energía, se perdía en discriminación; recordemos que cada microsegundo de pulso equivale a 150 metros de discriminación .

Con el desarrollo de técnicas de compresión de pulso esto se solucionó, y la discriminación no dependió más del ancho del pulso, con lo que se pueden utilizar potencias pico más bajas, lo que a su vez significa más posibilidades para la manipulación de potencias, anchos de banda, etc.

DOPPLER PULSADO

Una forma de poder medir distancias es hacer que la transmisión continua sea interrumpida cada cierto tiempo, de forma de medir distancias en forma similar al radar de pulso; esto dio origen al radar doppler pulsado, que en cierta forma resulta similar al radar de pulso con MTI (Movil Target Indicator / indicador de blanco móvil).

La diferencia estriba en que el doppler pulsado busca medir velocidades sin ambigüedades, pero con ambigüedad en distancia, mientras que al radar de pulso con MTI le interesa sólo rescatar los blancos móviles entre el clutter (empastamiento) de la señal reflejada, sin preocuparse por la velocidad de los mismos, o cuando más, aquellos cuya velocidad está dentro de ciertos márgenes muy amplios.

Su característica principal es que detecta la presencia de una frecuencia en lugar de tratar de detectar una señal por arriba de un determinado nivel de amplitud, lo que hace al doppler pulsado sumamente útil para rescatar al eco de un blanco en medio de clutter muy intenso y a un alto régimen de acercamiento, por ejemplo: los misiles rasantes.

Las Antenas

Constituyen la interfase entre el radar y el medio ambiente donde se propagará la

energía electromagnética.

A igual que los otros sensores que ya vimos, los radares, y todo equipamiento que utilice antenas (comunicaciones, SIGINT, etc), tendrán distintos campos visuales (FOV); uno fijo o instantáneo: la forma del lóbulo de la antena; y otros FOV formados por el barrido de esos lóbulos.

LA FORMA DEL LOBULO

Las antenas de varilla o los dipolos que se utilizan comúnmente en comunicaciones, tienen una irradiación y una recepción omnidireccional, es decir, en los 360°.

Como los radares necesitan determinar la ubicación espacial de un objeto o fenómeno, requieren antenas que sean direccionales; que dirijan y capten energía en un haz más o menos estrecho tanto en azimut como en elevación; y según la aplicación que tendrá el radar, será la forma que se le procurará dar a este haz o lóbulo.

Para lograr la direccionalidad del lóbulo, se puede recurrir a distintos dispositivos reflectores, directores, lentes, o híbridos.

Antenas de Reflector

Cuando se recurre a un reflector para conformar el lóbulo, la antena estará constituida por ese reflector y un dispositivo "emisor" (muchos lo llaman genéricamente "bocina") colocado en el foco del reflector. La más popular de las antenas de este tipo es la satelital, en donde el reflector es una superficie de forma parabólica (su curvatura responde a una parábola) y tiene en su foco una pequeña antena: el emisor/captor, de donde parte una conexión hacia el equipamiento electrónico.

Las antenas de radar son similares, y la forma final que tendrá el lóbulo dependerá de las características de ambos: el reflector y el emisor.

A fin de no hacer aún más complejo el análisis, evitaremos hablar de los emisores, y nos concentraremos en los reflectores.

Recién mencionamos las antenas parabólicas de satélite; este mismo tipo de reflector se utiliza por ejemplo para los radares de seguimiento o apuntado de las armas, porque la forma del lóbulo que se genera es circular y estrecho, llamado muchas veces "tipo lápiz" porque se parece a uno.

Permite ubicar con suma precisión un objeto en el espacio mediante la información de un ángulo en elevación, y un ángulo en azimut. La distancia, el tercer elemento para la completa ubicación espacial, estará provista, como vimos antes, por la señal modulada del radar.

Este tipo de lóbulo estrecho sirve para apuntar; pero si lo que queremos hacer es buscar para detectar, necesitaremos recurrir a lóbulos que tengan una de sus aperturas angulares (vertical u horizontal) lo suficientemente ancha.

Este es el caso de los radares de vigilancia o búsqueda (search), sea que busquen en el espacio aéreo (radares de alerta temprana por ejemplo), sea que busquen sobre el mar (patrulla marítima por ejemplo), sea que busquen detectar vehículos o personas en el campo terrestre.

Para cumplir con estas aplicaciones el lóbulo tendrá una apertura vertical lo suficientemente ancha como para detectar su blanco cualquiera sea la altura o elevación angular en que se encuentre (depresión angular si es patrulla marítima), y una apertura angular en azimut lo más estrecha posible para poder localizarlo azimutalmente.

De esta forma brindará dos de las coordenadas necesarias para localizar su blanco: azimut y distancia. Por eso se los suele denominar radares "2D".

A las antenas de este tipo, que generarán un lóbulo con la forma de una mano extendida, se los suele llamar "cosecante cuadrada", porque su abertura vertical obedece a la representación de una cosecante cuadrada.

A otras antenas similares se las conoce como **paraboloides** simples o compuestas, también porque sus curvaturas siguen la forma de la representación de una paraboloide. Un ejemplo clásico son los radares de tránsito aéreo que se ven en los aeropuertos.

Como a este tipo de radares les falta una tercera dimensión, altura (o ángulo de elevación), se ha recurrido a diferentes alternativas para obtenerla.

En los primitivos sistemas, se recurrió a un segundo radar, llamado "de altura", cuyo lóbulo tenía una aceptable apertura en el sentido azimutal, y era estrecho en la apertura vertical (denominado "cola de castor"); al imponerle un adecuado movimiento de oscilación arriba y abajo a la antena (barrido de cabeceo) se lograba medir el ángulo de elevación del blanco: el tercer parámetro.

Estos radares ya casi no existen, y son más pieza de museo que equipamiento operativo. Un ejemplo es el FPS-89 (de altura) que actuó junto al FPS-100 (2D).

Lo mismo sucede, aunque todavía hay algunos operativos, con unos radares soviéticos llamados de lóbulos en "V", cuyas fotografías eran muy populares en la década 70.

Consistían en dos antenas del tipo cosecante cuadrada montadas juntas, una con su lóbulo exactamente vertical, y la otra a un determinado ángulo de inclinación (de allí la "V").

La altura se obtenía como producto del tiempo que transcurría entre la aparición del blanco en la primera y en la segunda antena, cuando éstas rotaban; mayor era el tiempo, más alto estaba el blanco; recurriendo a unos ábacos manuales, según ese tiempo y la distancia al blanco, se determinaba la altura.

Nuevos desarrollos de la década 70 y posteriores procuraron obtener este tercer parámetro (altura) conformando este lóbulo único con varios sublóbulos "apilados", con la posibilidad de distinguir entre las señales (ecos) provenientes de uno u otro sublóbulo.

Esto se logró con varios emisores superpuestos y apuntados a distintas

partes del reflector. El ejemplo es el TPS-43.

Otra alternativa fue utilizar varios emisores separados $\frac{1}{2} \lambda$ (media longitud de onda) entre sí, y apuntados al reflector. Haciendo que la energía que emiten tenga un pequeño corrimiento de fase entre un emisor y otro, se logra que la energía emitida por el conjunto de emisores sea reflejada por partes distintas del reflector, y así obtener los sublóbulos, distinguibles unos de otros y con diferentes elevaciones según la magnitud del corrimiento de la fase. Se los llamó "**phase shift lobe**" (lóbulo por corrimiento de fase). Ejemplo el FPS-117.

El mismo procedimiento se utilizó, pero cambiando la frecuencia de emisión en lugar de realizar el corrimiento de fase, lográndose el mismo efecto. Se los llamó "**frequency shift lobe**" (lóbulo por corrimiento de frecuencia).

Otros desarrollos buscaron una combinación de los lóbulos "apilados" y los de "shift"; produciendo por ejemplo 3 lóbulos apilados que se convertían en 6 por el shift de la fase de la señal emitida. Ejemplo el RAT-31.

Una técnica que no continuó en desarrollo, salvo muy pocos ejemplares, fue una que formaba el lóbulo mediante un barrido electromecánico. El emisor rotaba mecánicamente a alta velocidad en el sentido vertical, apuntando un único lóbulo estrecho a distintas partes del reflector, en forma directa o utilizando un reflector secundario, con lo que producía el lóbulo total por barrido.

Fue llamado de barrido "**electromecánico**" o barrido "**Robinson**"; y se encuentra en algunos radares fabricados por Thales en la década 70; algunos usados para búsqueda y otros para medición de altura.

Otra técnica que se basa en el barrido de un sublóbulo para conformar el lóbulo único es la conocida como "**frescan**" (barrido de frecuencia). En ella toda una línea o ristra de emisores (por ejemplo una guía de ondas ranurada), utilizando la técnica de "frequency shift" iluminan al reflector en distintas posiciones para producir el lóbulo.

A diferencia de los sistemas por "shift", el corrimiento de frecuencias se hace en forma continua, logrando que el sublóbulo varíe continuamente su ángulo de elevación, hasta conformar el lóbulo completo. Ejemplo el AR3-D.

Finalmente, podemos utilizar la técnica de lóbulos apilados de la que hablamos al principio, pero agrupando los emisores en una forma especial, por ejemplo dos arriba y dos abajo (formando un cuadrado), juntos y superpuestos para que conformen un único lóbulo pero de cuatro sublóbulos.

Si los sublóbulos están lo suficientemente próximos, los cuatro captarán a la vez el eco que refleja un blanco; probablemente no todos con la misma intensidad, lo que indicará que el eco está desplazado hacia el lóbulo cuyo eco es el más intenso. De esta forma tendremos un sistema de apuntado que necesita un único retorno de un pulso para indicarnos si el blanco está centrado o no. Por eso a este tipo de radares se los conoce como "**monopulso**".

Hasta ahora hemos estado hablando de **antenas con reflector**, y como dan forma al lóbulo radar, sin considerar ni su aplicación ni la plataforma portadora,

aún cuando hemos dado ejemplos para clarificar los conceptos. Veamos ahora las antenas cuya forma es un plano.

Antenas Planares

Aún cuando habían sido concebidas antes, recién comenzaron a tener aplicación operativa en la segunda mitad de la década 70.

Si se colocan varios emisores agrupados uno junto al otro (como si fuera el ojo de una mosca) la energía total que se irradiará (y captará en recepción) será igual a la sumatoria de todas las energías parciales de cada emisor.

Si los emisores son colocados a una determinada distancia particular unos de otros, medidas en longitudes de onda (λ), y adecuadas las fases de sus emisiones, lograremos producir un lóbulo cuya forma será función de esa disposición (en longitudes de onda - λ) y de las fases.

Así, sin recurrir a un reflector, lograremos un lóbulo tan estrecho como deseemos.

Las primeras de estas antenas utilizaban como emisores a conjuntos de guías de onda ranuradas; por eso las antenas, por ejemplo la del AN/APG-66 del F-16, tienen el aspecto de una placa con ranuras uniformemente espaciadas.

Luego la tecnología permitió utilizar otro tipo de emisores para conformar la placa o estructura (array) de la antena, y que posibilitaba ajustar la forma del lóbulo mediante la acomodación de la fase. De ahí el nombre "phase array" (arreglo en fase, o distribución en fase, o estructura por fase).

Las primeras antenas de este tipo estaban mecánicamente estructuradas, de forma que produjeran una determinada forma de lóbulo, sin ninguna posibilidad de cambiarlo.

La tecnología posterior permitió manejar las fases por grupos de emisores, o colocar en los emisores pequeños dispositivos que produjeran el corrimiento de fase en forma individual (phase shifters / desplazadores- corredores de fase).

Si se controlan todos esos phase shifters mediante una computadora, se puede lograr que el lóbulo se mueva (barra) sin que se mueva la antena; lo que dio lugar al "electronic scanning" (barrido electrónico).

Además, la computadora podía jugar con los phase shifters acomodándolos para que generaran lóbulos con distintas formas, e incluso varios lóbulos de formas distintas en forma simultánea, dando origen a las antenas "multilobe" (multilóbulos).

Como cada uno de estos lóbulos puede barrer según una determinada función o aplicación; al radar se lo llamó "multifunction" (multifunción).

Todas estas facilidades hicieron que ya no fuese necesario que las antenas se movieran, lo que significaba una gran ventaja, tanto en el caso de grandes antenas, como cuando no se dispone de espacio suficiente, como es el caso de los aviones de combate.

A estas antenas que pueden hacer que sus lóbulos "se orienten" aunque ellas permanezcan "fijas" se las llamó "Electronically Steerable Antennas" (ESA / antenas rotables u orientables electrónicamente).

Antenas Activas

En lo que hemos visto hasta aquí, sea con antenas de reflector sea con antenas planares, la constitución del radar sigue siendo la misma: un conjunto TxRx y un conjunto antena.

La miniaturización de los componentes electrónicos permitió ir más allá.

Primero se desarrollaron preamplificadores para recepción, que se colocaron directamente en cada captor de la antena, asegurando una máxima captación de la señal que llega a la antena, y eliminando o reduciendo notablemente el ruido que podía ser agregado por la propia antena.

Una evolución posterior permitió colocar, primero etapas amplificadoras de transmisión, y finalmente, los transmisores en sí en la antena; tomando la comparación que hicimos antes, como si fueran los ojos de una mosca.

De esta forma, tanto el transmisor como una parte del receptor del radar quedaron incorporados a la antena.

A estos transmisores en antena se los llamó "**transmisores discretos**", y a las antenas "**active array antenna**" (antena de estructura activa); y finalmente a la ESA con transmisores discretos se la llamó "**AESA**" (Active Electronically Steerable Array / antena [o estructura, o arreglo, o conformación] activa orientable electrónicamente). Es por ejemplo la del F-18E.

Una síntesis de lo que hemos visto hasta acá se muestra en el gráfico N° 10.

EL BARRIDO DE LAS ANTENAS (según la aplicación del radar)

Definida en rasgos generales la forma en que se generan los lóbulos de las antenas, veamos ahora los distintos cubrimientos que se logran mediante el barrido que se les imprime a esos lóbulos.

Estos barridos permiten satisfacer la aplicación o función que cumplirá el radar; por eso la explicación que daremos a continuación es sólo una introducción al tema, el que será completado cuando se consideren las distintas aplicaciones de los radares bajo el título "los tipos de radares".

Sea para lograr la detección de los blancos, sea para lograr sus ubicaciones espaciales, sea para poder seguirlos o apuntarlos; se necesita que los lóbulos de las antenas se muevan (barran) de una determinada forma para cubrir un cierto volumen en el espacio aéreo, o una cierta superficie terrestre.

Mecánico o Electrónico

Una de las formas de lograr este barrido es haciendo que las antenas se muevan

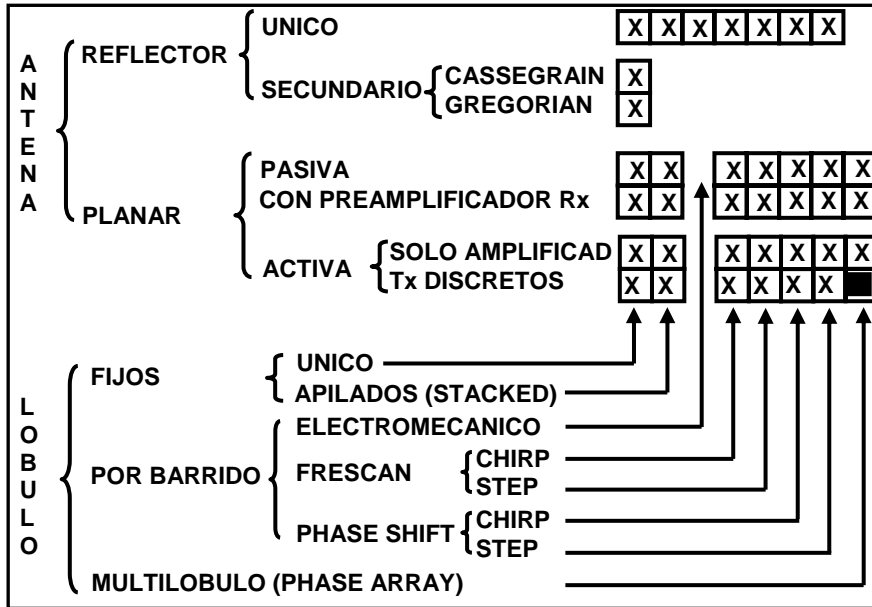


GRAFICO 10 - Posibles Combinaciones de Antenas y Lóbulos

angularmente; por ejemplo: en un radar de vigilancia o búsqueda, que necesita detectar blancos en los 360°, la haremos rotar en forma circular para que su lóbulo cubra sucesivamente esos 360°.

Cuando lo que se mueve es la antena, a ese barrido se lo llama **mecánico**; normalmente lo que se mueve es toda la estructura de la antena; pero en algunos casos, cuando las restricciones de lugar disponible, o el tamaño de las antenas, hacen que eso sea complejo, y además no se requiera que el barrido cubra una gran apertura angular, lo que se moverá, también mecánicamente, será el emisor.

Es el caso, por ejemplo, de algunas antenas para seguimiento de misiles o satélites, o de algunos radares abordo de aviones.

Hay una tendencia a confundir a estas antenas en las que lo que se mueve es el emisor, con las antenas tipo **Cassegrain** o **Gregorian**, las que tienen la particularidad que, debido a que utilizan un reflector con un radio de curvatura muy grande, recurren a un reflector secundario, cóncavo en el caso de las Cassegrain y convexo para las Gregorian, para evitar hacer una estructura demasiado larga para colocar el emisor en el foco del reflector.

La otra alternativa para lograr el barrido del lóbulo, es hacerlo en forma electrónica, como ya estuvimos viendo cuando consideramos las distintas formas para generar el lóbulo.

Utilizando el mismo principio, de corrimiento de la frecuencia o corrimiento

de la fase, se logra que todo el lóbulo se desplace, produciendo el barrido. Por supuesto, esta técnica de barrido es sólo aplicable cuando el sector angular a barrer no es grande, normalmente inferior a los 150/160°; cuando se requiere mayor cubrimiento, se debe recurrir a dos o más antenas que se complementen.

Ejemplo, los radares AESA de las fragatas AEGIS de USNAVY, o el del F-18E que recién mencionamos.

En resumen, el barrido puede ser producido por un desplazamiento:

- mecánico:
 - de toda la antena
 - del emisor solamente
- electrónico del lóbulo

EL CUBRIMIENTO DADO POR EL DESPLAZAMIENTO TOTAL DE LA ANTENA

Hasta ahora hemos visto dos coberturas o cubrimientos, o FOV del radar:

- Uno dado por el lóbulo en sí: cuanto mide angularmente en azimut y en elevación.
- El segundo dado por el desplazamiento o barrido de ese lóbulo, sea en forma mecánica o electrónica, y que determina angularmente cual es el volumen total que cubre el lóbulo durante su barrido.

Hay una tercera cobertura, o cubrimiento, que estará dado por los máximos desplazamientos angulares entre los que se puede "posicionar" la antena.

Un ejemplo: el radar de barrido cónico que veremos más adelante; este tipo de radar, usado para el seguimiento de blancos, tiene:

- Un lóbulo con una **apertura** (cubrimiento) muy estrecha tanto en azimut como en elevación. Por ejemplo 1°.
- Un cubrimiento de **barrido**, producido por el lóbulo al rotar con un cierto descentrado angular alrededor de un eje, y que produce un volumen de cubrimiento en forma de cono.
- Ese cubrimiento en forma de cono, podrá ser apuntado, tanto en azimut como en elevación, para abarcar diferentes áreas en el espacio. Los **máximos desplazamientos** que admita la antena determinarán el tercer cubrimiento. La antena del ejemplo, si pertenece a un sistema superficie aire, normalmente podrá ser apuntada en los 360° en azimut y entre -1° y +70° en elevación.

De esta forma, al analizar los radares debemos considerar tres cubrimientos diferentes dados por:

- La apertura del lóbulo.
- El barrido del lóbulo.
- Los máximos desplazamientos de la antena.

Cuando analizamos el sistema de armas completo, a estos cubrimientos

debemos agregar un **cuarto cubrimiento**, o más precisamente: envolvente; el dado por el alcance de las armas (cañones o misiles).

Radars Para Sistemas de Armas Contra Blancos Aéreos

Para poder atacar un blanco, es necesario:

- Buscarlo, detectarlo, y adquirirlo como blanco.
- Seguirlo, para poder hacer los cálculos necesarios para interceptarlo.
- Guiar el misil, o apuntar los cañones hacia él.

Esta secuencia se debe realizar siempre, de una forma u otra, recurriendo a cualquiera sea el dispositivo, y que no siempre será un radar.

Esta secuencia también se realizará, sea que el blanco sea aéreo, terrestre o naval; y que la plataforma en que esté montado el o los radares sea aérea, terrestre, naval, o el mismo misil.

Para tratar de hacer un análisis más o menos digerible, relacionaremos a determinadas plataformas y blancos, comenzando por aquellos que resultan tal vez los más comunes o más tratados en otras bibliografías: las plataformas (sistemas de armas) terrestres contra blancos aéreos; o sea los radares para baterías antiaéreas y para misiles superficie-aire.

RADARES PARA SISTEMAS DE ARMAS SUPERFICIE (TIERRA) - AIRE

Estos sistemas normalmente no tienen limitaciones de espacio, peso, energía, etc. y por eso suelen emplear varios radares, uno para cada función.

Las posibles combinaciones son muchísimas, incluso algunas combinando radares con sistemas ópticos o infrarojos, por lo que sólo trataremos de explicar los más clásicos.

Radars de Búsqueda o Adquisición

Recién dijimos que lo primero que debe hacer el sistema de armas es buscar el blanco, detectarlo y adquirirlo; lo hará con un radar al que se denomina "de búsqueda" o "de adquisición"; el más comúnmente usado es uno que tenga un lóbulo con una gran apertura en elevación y estrecha en azimut, con la antena rotando en los 360° o barriendo un sector, según la situación táctica.

Aunque algunos de estos radares sólo tienen un lóbulo y por lo tanto no miden altura, la mayoría utiliza al menos dos lóbulos y alguna técnica, de las que vimos al considerar las antenas, para lograr al menos un ángulo de elevación aproximado del blanco, que permita el apuntado del segundo de los radares, el de seguimiento, que necesita recibir como información la posición del blanco en azimut y en elevación.

En la mayoría de los sistemas, este proceso es automático; es el radar de búsqueda el que apunta a la antena del radar de seguimiento sobre el blanco que

se ha seleccionado.

En otros casos, el radar de seguimiento sólo es apuntado en azimut, y necesita su propio operador para que lo apunte en elevación.

Otras configuraciones no utilizan un radar de seguimiento, y lo que el radar de búsqueda apunta es la rampa de misiles o los cañones, y un operador, mediante sistemas ópticos o infrarojos, realiza el seguimiento manual del blanco para mantenerlo apuntado.

La función del radar de búsqueda o adquisición es brindar uno, dos o los tres parámetros siguientes del blanco:

- Angulo en azimut.
- Angulo en elevación.
- Distancia.

Algunos sistemas, para ahorrar en equipamiento, volumen, energía, etc., han recurrido a utilizar el radar de seguimiento (descrito más abajo) para cumplir también funciones de adquisición del blanco.

Esto lo han logrado dándole a la antena de seguimiento la posibilidad de efectuar un segundo tipo de barrido que permita la adquisición del blanco.

Esto significa limitaciones, sobre todo en cuanto al tiempo de renovación de la información, y esto a su vez significa limitaciones para la detección del blanco, y por lo tanto, significa vulnerabilidades que pueden ser explotadas.

Lo común es hacer que los radares de seguimiento, aún cuando la apertura de su lóbulo es estrecho, realicen barridos de búsqueda y adquisición. Según la forma en que lo realizan reciben las siguientes denominaciones:

- **Helicoidal**
- **Raster o Secuencial**
- **Espiral**

Como el cambio de barrido, para pasar del de adquisición al de seguimiento, demandaba tiempo y generaba problemas de esfuerzos en las estructuras de las antenas, se desarrolló el sistema "**Palmer**", que realiza simultáneamente ambos barridos durante la adquisición, resultando así más fácil pasar al de seguimiento una vez adquirido el blanco, a la vez que aumenta el volumen de cubrimiento por unidad de tiempo. Así surgieron los barridos:

- **Palmer helicoidal**
- **Palmer secuencial**
- **Palmer espiral**

Los soviéticos desarrollaron un sistema que, aunque limitado en cubrimiento azimutal, les aseguraba rapidez en la adquisición del blanco, y además les permitía tanto adquirir como seguir varios blancos simultáneamente.

Para hacerlo utilizaron dos antenas con un lóbulo de gran apertura en uno de los ejes y estrecha en el otro, colocando ambas antenas de forma que produjeran dos barridos perpendiculares, uno en azimut y el otro en elevación. El radar fue denominado "Track While Scan" (**TWS** / seguimiento mientras barre).

Por supuesto, el advenimiento de las antenas "phase array", con sus posibilidades de conformar y mover el lóbulo a voluntad, cambió completamente estas concepciones, que estaban basadas en antenas de reflector.

Como estos radares de adquisición suelen ser de un alcance limitado, normalmente están asociados a sistemas de defensa aérea que poseen radares de búsqueda de largo alcance, también llamados de alerta temprana (**EW** – Early Warning), que les agregarán entre otras cosas, el suficiente tiempo de reacción contra blancos veloces.

Radares de Seguimiento de Blancos

Estos radares necesitan tener capacidad para seguir (mantener apuntado permanentemente) al blanco en forma automática, y hacerlo con la suficiente precisión espacial (al menos angular, en azimut y elevación) que permita apuntar cañones o guiar misiles.

En los comienzos, el más clásico fue el de **barrido cónico** (conical scan - **COS**), que como ya dijimos, consistía en un lóbulo de apertura estrecha (tipo lápiz) que producía un barrido cónico al hacer que su antena rotara en forma continua y descentrada alrededor de un eje.

Una variante hizo que en lugar de que la antena rotase en forma continua, lo hiciese por pasos, apuntándose a determinados lugares del cono, lo que creó una antena de **apuntado secuencial** (sequential lobing - **SL**).

El paso lógico fue hacer que en lugar de ir apuntando el lóbulo en forma secuencial, se hiciese el apuntado simultáneo de varios lóbulos (normalmente 4), uno a cada dirección del apuntado secuencial.

Como todos los lóbulos apuntaban simultáneamente, todos a la vez recibían información de la posición relativa del blanco, por lo que bastaba un sólo pulso para determinar con precisión la posición del blanco, llamándosele por lógica "radar monopulso".

A todo esto hubo que agregar las necesidades de supervivencia que impuso la guerra electrónica, que llevaron a desarrollar nuevas opciones, en las que el radar sólo efectuaba el barrido en la recepción, utilizando para la transmisión un único lóbulo lo suficientemente ancho como para cubrir el mismo volumen que en recepción.

Estos fueron los llamados radares de barrido del receptor solamente (**LORO** – Lobe On Receive Only); surgiendo el **COSRO** (barrido cónico del receptor solamente) y el **SLRO** (barrido secuencial del receptor solamente); también el TWS tuvo su contraparte **TWSRO**.

Radares para el Guiado de los Misiles

Una vez adquirido y localizado con precisión el blanco, sólo queda: o apuntar los cañones, lo que se hace automáticamente porque éstos normalmente son

solidarios con el radar de seguimiento; o guiar al misil superficie-aire.

En general, para el guiado del misil por radar existen dos posibilidades:

- Que tanto el transmisor como el receptor de radar estén abordo del misil.
- Que abordo del misil sólo se encuentre el receptor del radar.

Para los casos que estamos considerando ahora de los misiles superficie-aire, lo común es que abordo del misil sólo se encuentre un receptor de radar, el que puede ser utilizado en tres formas diferentes:

- Captando directamente la señal proveniente del radar de seguimiento, mediante antenas en su cola; lo que lo definirá como un guiado de **haz cabalgado** o beam rider.
- Captando el eco reflejado por el blanco, mediante antenas en su trompa; con lo que su guiado será "**semiactivo**".
- Utilizando un receptor de radar especialmente adecuado para captar las emisiones del radar del blanco, por ejemplo, su radar de navegación, por lo cual al guiado se lo llama "**pasivo**".

Cabe aclarar que este último tipo de guiado, aunque lo hemos mencionado aquí, no está relacionado con los radares propios del sistema superficie-aire, y no es exclusivamente un guiado basado en la emisión radar, ya que como guiado pasivo se considera aquel que utiliza cualquier señal emitida por el blanco.

RADARES PARA SISTEMAS DE ARMAS MAR-AIRE

Abordo de los buques, el sistema contra blancos aéreos es bastante parecido al terrestre.

Normalmente estará constituido por un radar de búsqueda "aire" y uno de seguimiento y guiado.

Los radares de búsqueda aire son similares a los de alerta temprana terrestres, pero con parámetros y características de propagación optimizados para su operación en el mar.

Los radares para el seguimiento y guiado de los misiles son similares a su contraparte terrestre.

RADARES PARA SISTEMAS DE ARMAS AIRE-AIRE

En el caso de los aviones de combate como plataformas, existen limitaciones de espacio y peso; por eso es un único radar el que cumple todas las funciones: detección del blanco, seguimiento, y guiado de los misiles.

Para hacerlo, el radar de abordo debe tener por lo menos dos modos diferentes de operación, y de barrido de la antena; uno para búsqueda, y otro para seguimiento; y en el caso que el misil sea del tipo semiactivo, también deberá realizar la iluminación permanente del blanco.

A veces, se suele recurrir a otros sensores en lugar de uno de los modos del

radar. Por ejemplo, si se desea no emitir para guardar discreción y no ser detectados hasta estar dentro de la envolvente de los misiles propios, se puede utilizar un FLIR para realizar la búsqueda y detección en lugar del radar; es el caso del MiG-29 entre otros.

Como la superficie terrestre refleja las señales de radar, si se quiere tener capacidad para detectar, adquirir y seguir blancos que se encuentren por debajo del nivel propio, se deberá poseer un radar que, recurriendo a las características del doppler, pueda "mirar hacia abajo" (look down).

Lo estrecho del espacio disponible para las antenas en la trompa de los aviones de combate crea grandes penalizaciones en cuanto a cubrimiento, sobre todo a los lados, limitando también la estrechez de la apertura del lóbulo, cuando la antena es la clásica de reflector.

Las antenas planares, aún cuando sean de barrido mecánico, mejoran notablemente estos aspectos, en especial el ancho del lóbulo; y la solución a todas las limitaciones la constituyen las antenas de barrido electrónico (ESA o AESA).

El mismo radar también suele ser utilizado para navegación y para meteorología, con lo cual se obtiene un radar "multimodo", que como recién dijimos, sólo tiene reales capacidades en todos sus modos cuando la antena es ESA o AESA; si es de barrido mecánico, tendrá soluciones de compromiso para satisfacer a todos los modos de operación.

RADAR ABORDO DEL MISIL

El radar también puede ser usado como "**seeker activo**" montado en la trompa de un misil, con lo cual el misil es completamente autónomo, no dependiendo en absoluto de ayuda exterior una vez lanzado; son los conocidos como "lanza y olvida", y clasificados como de guiado activo.

Aunque no son comunes contra blancos aéreos, en el mercado se encuentran algunos de muy largo alcance (superior a las 50 NM) basados en esta técnica.

Radares Para Sistemas de Armas Contra Blancos Navales

Resulta relativamente sencillo discriminar a un buque de su entorno, mar y cielo, utilizando la técnica adecuada; pero en general, el buque constituye un blanco peligroso, ya que normalmente posee suficientes defensas como para repeler un ataque.

Por eso, cualquiera sea la plataforma portadora que se utilice para lanzar misiles contra buques (anti ship), éstas normalmente los lanzaran fuera del alcance de las armas defensivas del buque, y en la mayoría de los casos el lanzamiento se realizará a la cota lo más baja posible, para evitar ser detectado, negándole así al buque-blanco tiempo para reaccionar. Recordemos la especulación sobre CR.

Esto hace que la mayoría de los misiles antibuque sean de guiado radar

activo (con el radar completo – tx y rx – abordado del misil), no importa que la plataforma lanzadora sea aérea (avión o helicóptero), otro buque, o sea lanzado desde tierra.

Para el apuntado y lanzamiento del misil se utiliza el radar de búsqueda u otro sensor de la plataforma portadora.

Radares Para Sistemas de Armas Contra Blancos Terrestres

A diferencia del buque en el mar, resulta complejo, al menos por ahora, discriminar al blanco terrestre de su entorno, por lo que el radar, salvo el milimétrico, (Ej.: el Longbow Hellfire), no es utilizado contra este tipo de blancos.

En este caso el radar es utilizado como iluminador para que el seeker del misil se monte sobre la señal reflejada por el blanco.

Radares Contra Misiles Balísticos

Para analizar estos radares debemos repasar brevemente algunos conceptos sobre Misiles Balísticos; lo haremos basados en la concepción de USA, ya que es quien más ha desarrollado el tema, y por tanto es quien fija los lineamientos generales que después adopta el resto de los países.

Cuando se trata de misiles balísticos, el problema a resolver no es exactamente el radar, ya que éste opera a la velocidad de la luz; el problema a enfrentar en el CR (la ventana de tiempo que brinda el misil balístico como blanco), está dado por la velocidad del misil atacante, que obliga a lograr un sistema de armas con un misil capaz de actuar dentro de esa escasa ventana de tiempo.

No obstante, los radares en sí deben ser adecuados a las características de la trayectoria (balística) del blanco.

LOS MISILES

Antiguamente, durante la guerra fría, se solía hablar de misiles balísticos intercontinentales (ICBM), de rango medio (MRBM), y de rango intermedio (IRBM).

Al desaparecer el conflicto NATO-Pacto de Varsovia, USA realizó una nueva clasificación de los mismos y comenzó a considerarlos según el siguiente agrupamiento:

- ICBM: Considerando como tales a los que son amenaza para USA continental (CONUS).
- Theater BM (de teatro): Los que se emplean en el campo táctico dentro de un teatro de operaciones; con alcances de 1500 km (algunos consideran 3000 km) o menos.

LA TRAYECTORIA Y LA DEFENSA

Como con todo blanco, lo primero a realizar es su detección, para luego poder actuar contra él; pero a esta primera tarea la consideraremos después, al hablar de los radares para la detección de los misiles, para concentrarnos en el ataque al misil balístico.

Para actuar contra los misiles balísticos se deben considerar las distintas fases de su trayectoria, que son:

- **Boost** (empuje o aceleración): Inmediatamente luego del lanzamiento; es la parte más vulnerable, ya que el misil está acelerando, es fácilmente detectable por su cola de gases (IR), y mantiene un ángulo (trayectoria) de ascenso casi constante. Según el misil, esta fase demora entre 2 a 5 minutos.
- **Ascenso**: Apagados y separados sus motores, seguirá ascendiendo por otros 3 a 10 minutos.
- **Midcourse** (parte superior de la parábola o vuelo intermedio): Que en los intercontinentales puede durar hasta 20 minutos. Algunos misiles al final de la misma lanzan cabezas señuelo.
- **Terminal**: La parte final de la trayectoria, que es muy breve, apenas 30 ó 40 segundos; en la que aparte de seguir al misil, también se debe discriminar entre la cabeza verdadera y los señuelos.

Para los misiles de alcances superiores a los 1500 km hay técnicas particulares para su detección e intercepción; pero para los misiles de teatro y de corto alcance, podemos considerar que las técnicas que se aplican se basan en radares y sistemas que son bastante similares a los utilizados para defensa contra blancos aéreos.

El interés por estos sistemas comenzó después de la guerra del Golfo, especialmente entre 1993 y 1995, aún cuando para la guerra ya se poseían los primeros modelos de Patriot.

Siempre tomando como referencia lo hecho por USA, a la defensa contra los misiles se la ha clasificado según la fase de la trayectoria en:

- **Boost** Defense Segment (BDS / Segmento defensa en la fase de empuje).
- **Midcourse** Defense Segment (MDS / Segmento defensa en la parte intermedia de la trayectoria).
- **Terminal** Defense Segment (TDS / Segmento defensa en la fase terminal).

Los desarrollos posteriores al Golfo llevaron hacia sistemas de armas que procuran la intercepción en la fase terminal (TDS) o un poco más allá, en la parte final del midcourse; y por supuesto, buscan la detección lo más temprana posible; por eso la mayoría busca como complemento la detección en la fase de Boost, recurriendo a sensores IR en satélites.

Aunque en un principio se hablaba sólo de defensa contra misiles balísticos de teatro (**TBMD** – Theater Ballistic Missile Defense), que llegan a los 1200 – 1500 km, los programas y desarrollos posteriores fueron ampliando el espectro, y actualmente se tiene al TBMD subdividido en:

- **Upper Tier** (nivel o capa superior – o exoatmosféricos): que comprende los sistemas de mayor alcance:
 - El THAAD (Theater High Altitude Area Defense / Defensa de área del teatro de alta altitud), de USA.
 - El AWS (Arrow Weapon System / Sistema de arma Arrow), desarrollado en conjunto por USA e Israel.
- **Lower Tier** (nivel o capa inferior – o endoatmosférico): basado en el Patriot PAC-3 (Patriot Advanced Capability – 3).
En la segunda mitad de la década 90 surgieron nuevas opciones:
- **EAD** (Extended Air Defense / defensa aérea extendida): para misiles de 500 a 750 km.
- **MEADS** (medium Extended Air Defense System / sistema de defensa aérea medio extendida): en el que junto a USA participan Alemania e Italia.

LOS RADARES

Esta gran variedad de sistemas de armas ha hecho que también sean variados los radares utilizados.

No obstante, todos se basan, con algunas salvedades, en un mismo procedimiento, similar al utilizado para la localización de morteros, pero por supuesto utilizando radares completamente diferentes.

Su objetivo es detectar el lanzamiento de los misiles balísticos, si es posible, en su etapa de ascenso, o cuando comienzan la parte superior de la parábola, y así determinar su trayectoria.

Para ello el radar posee un lóbulo que ilumina un sector azimutal fijo sobre el área de probable lanzamiento, cubriendo la máxima apertura horizontal posible, y con una adecuada apertura vertical que permita la detección e iniciar el seguimiento.

Esta forma de lóbulo suele llamarse "fence" (cerca), y paradójicamente utiliza la misma técnica que los primitivos radares experimentales de la década 30, ya que detecta al misil cuando éste atraviesa el lóbulo, a igual que lo hacían aquellos radares con los aviones.

Una vez ubicado el lugar del espacio donde se detectó el cruce del misil, si no es posible seguirlo a partir de esta detección, se buscará de detectar nuevamente al misil en un segundo lugar de cruce, para calcular la trayectoria y esperarlo con los radares de seguimiento y control de fuego.

La conformación de los sistemas de armas es similar a los sistemas de

defensa aérea, con un radar para la vigilancia y detección, uno o dos radares de seguimiento, y los lanzadores de misiles.

Por ejemplo, el MEADS comprende:

- 1 radar de vigilancia en UHF
- 2 radares de seguimiento en banda X (MFCR – Multifunction Fire Control Radar)
- 6 lanzadores de 12 misiles cada uno.

En algunos desarrollos los radares de vigilancia se basan en radares (del tipo active phase array) ya existentes para defensa aérea, optimizados mediante modificaciones para su uso tanto contra misiles balísticos como de crucero, aviones o VeNTri; por ejemplo el radar SPY-1 de los buques AEGIS de USA, o el radar TPS-59.

Actualmente, aunque ya hay sistemas a los que se les ha otorgado su IOC (capacidad operativa inicial), como el Arrow israelí (nov00), el Patriot PAC-3 (set01), o el ruso S-300V (99), la mayoría de los sistemas aún están en plena experimentación y evolución, y por lo tanto también sus radares.

Radares Para Búsqueda y Vigilancia Aérea

Son los radares de mayor alcance, que procuran cubrir el máximo espacio aéreo en donde puede operar un avión, dentro de las limitaciones que impone la curvatura de la tierra.

Como el eco que devuelve un avión depende de su tamaño, forma y reflectividad; que resulta en lo que es conocido como "superficie radar equivalente" (Radar Cross Section – **RCS**); se toma generalmente como referencia para determinar el cubrimiento del radar, una superficie equivalente de 1 m² (avión metálico pequeño).

EN INSTALACIONES TERRESTRES

Como ya dijimos, la curvatura de la tierra impone una gran limitación, ya que el haz de radar se propaga en forma casi tangencial a la superficie terrestre en el sitio de emplazamiento del radar.

Por eso, aún cuando ahora las energías radiada y recibida no presentan problemas para lograr más alcances, la limitación dada por la curvatura de la tierra ha hecho que estos radares de alerta temprana no cubran más allá de las 220/230 NM; ya que a estas distancias, un radar al nivel del mar, sólo detecta aviones a aproximadamente 36.000 ft o más.

Como en defensa aérea siempre se procura lograr un cubrimiento continuo y a la cota más baja posible, los radares se deben colocar próximos, con sus cubrimientos solapándose.

Los radares se pueden colocar más separados si se rellenan los huecos que

quedan entre la parte inferior de sus lóbulos y la superficie de la tierra con radares de menor alcance, conocidos como "gap filler" (rellenador de huecos).

Cualquiera sea la aplicación militar de estos radares de largo alcance, se les va a requerir que brinden una ubicación más o menos precisa de los ecos en el espacio aéreo, por lo que deberán brindar las tres dimensiones, sea cual sea la técnica que utilizan.

ABORDO DE BUQUE

El equivalente del radar de alerta temprana abordo de los buques es el radar de "búsqueda aire", cuyos parámetros y características de propagación, como antes mencionamos, son optimizados para su uso en el mar.

AEROPORTADO

Una de las formas de lograr cubrimientos (detección) a bajas cotas es elevar la altura de la antena del radar.

Esto ha llevado a montar radares de alerta temprana abordo de plataformas aéreas, pudiendo ser aviones, helicópteros, VeNTri, o aeróstatos. Son los radares conocidos como **AEW** (Airborne Early Warning / Alerta Temprana Aeroportados).

Como estos radares van a mirar hacia abajo, y por lo tanto van a captar el reflejo de la superficie terrestre, que les empastará la pantallas impidiéndoles detectar a sus blancos; deben tener la capacidad de suprimir este empastamiento.

Actualmente existen plataformas y sus radares asociados de las más diversas características. El más conocido es el **AWACS** (Airborne Warning And Control System / sistema aeroportado de alerta y control).

La diferencia entre AWACS y AEW está dada en que el término AEW sólo se refiere a un radar y una pequeña capacidad de visualización montada abordo de una aeronave. El término AWACS en cambio, significa que la plataforma, además del radar, posee una cierta capacidad de C^2 (tiene la capacidad de un CIC pero es Aeroportado).

Aunque este distingo en siglas sólo se hace para el AWACS, existen otros sistemas aeroportados que también tienen capacidad de C^2 , aún cuando no se haga el distingo en sus siglas.

Por supuesto, las capacidades de cada sistema son particulares, ya que además de la diferencia de poseer o no una cierta capacidad de C^2 , los radares instalados a veces cubren los 360° y otras sólo sectores parciales.

Igualmente, las capacidades de unos y otros para procesar determinados tipos y cantidades de blancos son diferentes, pues esto depende de la técnica usada para procesar la eliminación del empastamiento que produce la superficie terrestre.

Son utilizados en forma indistinta, sobre tierra o sobre mar.

BIESTATICO

Una de las formas de buscar la supervivencia de los radares, e incluso lograr que fueran eficientes contra aviones furtivos (tipo F-117), fue separar la ubicación del transmisor y el receptor, colocándolos en dos ubicaciones completamente separadas; dando nombre al radar "biestático".

De esta forma, la parte receptora al menos quedaba más protegida al no poder ser localizado por las emisiones.

Entre las opciones para la ubicación del transmisor surgió su instalación abordo de una plataforma aérea, procurando ubicarla en un santuario, más allá del alcance de las armas del enemigo.

También se puede lograr que este tipo de radares funcione obviando el transmisor propio, recurriendo a otros emisores "de ocasión".

Ese transmisor radar de ocasión puede ser cooperativo o no, pero en éste último caso su posición se debe conocer con precisión para poder determinar la ubicación de los blancos, ya que el procedimiento consiste en colocar emisor y receptor en los focos de una elipse imaginaria, y así los blancos son posicionados según la curvatura del perímetro de esa elipse.

El sincronismo para la posición se logra por la recepción del pulso transmitido, tanto en forma directa como vía el eco reflejado por el blanco.

En el caso de los buques por ejemplo, uno de los buques emite con su radar y los otros reciben en forma pasiva el eco reflejado por los blancos.

Se han hecho investigaciones incluso para utilizar cualquier emisor que irradie en las frecuencias adecuadas como transmisor, por ejemplo, captando el reflejo (rebote) que los blancos producen de las emisiones de TV comerciales, ya que los experimentos han mostrado que las mejores bandas para esta técnica es la de emisiones de FM y TV, entre 50 y 800 MHz.

Por ahora esto sólo es investigación de una técnica llamada Passive Coherent Location (**PCL** / localización coherente pasiva).

Radares para Ayuda al Tránsito Aéreo

Como ayuda y control del tránsito aéreo existen varios tipos de radares que son útiles en su aplicación al campo militar, y que por lo tanto debemos conocer.

Para el movimiento aéreo el espacio se divide en volúmenes o áreas de diversas dimensiones; para cada una de estas áreas hay un determinado tipo de radar a usar, pudiendo distinguir entre los utilizados para controlar las distintas fases del vuelo, y los empleados para ayuda al aterrizaje.

Sobre esa base los podemos agrupar en aquellos para:

- Control de:
 - Rutas aéreas.
 - TMA
 - Aeropuerto.

- Ayuda al aterrizaje mediante:
 - GCA/PAR
 - Decca.

Aquí debemos hacer una aclaración, ya que es común que nos confundamos debido a la denominación incorrecta que se le da al mal llamado "radar secundario" (**SSR** – Secondary Search Radar). Por este nombre se conoce en tránsito o aéreo al IFF/SIF, pero SSR e IFF/SIF no son exactamente lo mismo, teniendo en común sólo los modos 3/A y C; lo que también presta a confusión, ya que hace creer que tienen la misma aplicación militar.

El SSR no es en realidad un radar, ya que está constituido por un conjunto transmisor y receptor terrestre, denominado interrogador, y un transmisor y receptor abordo de las aeronaves denominado transponder.

En este mal llamado radar secundario, el interrogador transmite un tren de pulsos codificados, el que es captado por el receptor del transponder, y éste en respuesta transmite un nuevo tren de pulsos codificados que es recibido por el receptor del interrogador.

En realidad se lo denominó radar secundario para diferenciarlo del radar en si, al que se denomina **radar "primario"**.

PARA CONTROL EN RUTA

Son los de mayor alcance, normalmente alrededor de las 220 NM.

En las décadas 60 y 70 éstos y los de alerta temprana utilizados para defensa aérea eran similares; pero cuando los últimos comenzaron a ser 3D, se produjo una diferencia entre ellos, ya que los de tránsito aéreo no necesitan medir altura, pues ésta es provista por el modo C del radar secundario.

A fines de los 70 el concepto se revirtió, ya que en procura de ahorro de medios se comenzó a integrar lo más posible todos los elementos que podían servir tanto para el tránsito aéreo como para la defensa aérea, partiendo de la utilización de un mismo radar, por lo que los radares de tránsito aéreo en ruta ahora también son 3D, para así servir a la defensa aérea.

En general son radares con lóbulos del tipo cosecante cuadrada, con alcances de 220 NM y que rotan a 6 RPM.

PARA TMA

La TMA es un área crítica para el control del tránsito aéreo, ya que dentro de ella las aeronaves están continuamente cambiando sus parámetros de vuelo; por eso se utilizan radares con lóbulos también de forma cosecante cuadrada, pero midiendo sólo 2 dimensiones (azimut y distancia), y cubriendo un poco más allá del límite de la TMA, normalmente 60 NM, rotando a mayor velocidad que los de ruta, a 15, 20 ó 30 RPM, para adecuarse al régimen de renovación de información que se requiere.

DE AEROPUERTO

Orientado al control del movimiento aéreo en la superficie del aeropuerto, para permitir ver más allá del alcance visual de la torre, se basa en el doppler pulsado para poder discriminar las aeronaves y otros vehículos dentro de la infraestructura del aeropuerto.

Su alcance es sólo el del perímetro del aeropuerto.

PARA ATERRIZAJE GCA/PAR

Este radar, denominado **PAR** (Precision Approach Radar / radar de aproximación precisa), consiste en dos radares con sus antenas realizando un barrido sectorial y a 90° una de otra; y orientadas con la trayectoria de descenso.

Una posee un lóbulo de haz estrecho en horizontal y amplio en vertical, que barre sectorialmente a ambos lados de la proyección del eje de la pista. La otra posee un lóbulo de haz estrecho en vertical y ancho en horizontal, que cabecea arriba y abajo de la pendiente de descenso.

Ambas informaciones se presentan en una única pantalla permitiendo al operador del radar visualizar si la aeronave que se aproxima está correctamente ubicada en la trayectoria de descenso; dándole indicaciones de correcciones por radio al piloto.

Esta ha sido una ayuda siempre polémica, debido a que la responsabilidad del aterrizaje es compartida entre el piloto y el controlador radar; por eso donde ha sido posible ha sido remplazado por ILS o MLS, quedando sólo relegado a aquellos sitios en donde las características orográficas del terreno no permiten un buen desempeño del ILS o MLS. Estaría próximo a desaparecer, ya que la solución definitiva a los aterrizajes está ahora llegando con el GPS.

En sus variantes móviles, es muy utilizado por las fuerzas en sus despliegues a teatros de operaciones en donde los aeródromos no poseen radioayudas adecuadas.

A veces, el radar PAR está complementado con un radar de búsqueda 2D con un alcance no superior a las 30/40 NM, y que sirve para localizar inicialmente a la aeronave y llevarla hacia la trayectoria de descenso.

Al conjunto completo se lo llama **GCA** (Ground Control Approach / control de aproximación desde tierra).

DECCA PARA ATERRIZAJE

Este radar conservó como designación el nombre de su fabricante. Ya prácticamente no queda ninguno operativo.

Mucho más sencillo que el GCA/PAR, era un radar que rotaba en los 360° y emitía un haz estrecho en horizontal y con una apertura de 2° en vertical, orientado para que el centro de estos 2° coincidieran con la pendiente de

descenso.

El operador de radar guiaba a las aeronaves para que se mantuvieran dentro de esos 2° y sobre la prolongación del eje de pista.

Radars para Uso Propio de las Plataformas Aéreas

Cuando vimos los radars para sistemas de armas aire-aire, describimos los que normalmente son conocidos como "radars de tiro". Para poder cumplir con sus misiones los aviones o helicópteros necesitan de otros radars, o en realidad "modos" de radar, ya que lo normal es que un mismo radar cumpla varias funciones diferentes.

DE SEGUIMIENTO DEL TERRENO

A fines de la década 70 y a principios de la 80 hubo una obsesión para escapar a la detección de los radars de las defensas aéreas enemigas, la solución que se encontró fue volar lo más bajo que fuese posible, para quedar oculto por la orografía y la vegetación.

Incluso en esa época se desarrollaron nomogramas y gráficos para determinar la mejor relación velocidad/altura para no dar tiempo a reaccionar (CR) a las armas antiaéreas.

Volar a pocos metros del suelo y a .8 ó .9M durante un cierto tiempo requiere muy buenos reflejos y es agotador, por lo que se desarrollaron sistemas que automáticamente controlaban los comandos del avión para hacer que éste siguiese un perfil de vuelo pegado al terreno.

El sensor al que se recurrió para poder hacerlo fue un radar, llamado "terrain following" (de seguimiento del terreno) que según la altura de los obstáculos que captaba delante del avión, lo hacía mover en el plano vertical.

Como este radar tenía la limitación que sólo veía una franja de terreno angosta al frente, sólo podía mover al avión en el plano vertical, obligándolo a veces a grandes aceleraciones cuando en realidad hubiese sido más fácil esquivar el obstáculo moviéndose hacia el costado.

Esto llevó al desarrollo de un sistema que permitía evitar los obstáculos con desplazamientos tanto verticales como horizontales; a este radar se lo llamó "terrain avoidance" (traducido normalmente como evitación de obstáculos).

En la mayoría de los casos, recurría a un modelo del terreno que permitía su comparación con lo real que captaba el radar, dando un preaviso suficiente al saber como será el terreno a encontrar a los costados y adelante.

La posterior gran proliferación de armas superficie-aire de corto alcance (alturas menores a 15 kft), llevó a que fuese más práctico, como ya lo analizamos antes, volar por arriba de los 15 kft, previa la supresión de las defensas aéreas que superan esa cota; por lo que fue cayendo en desuso, al menos por ahora, este tipo de radars.

METEOROLOGICO / PARA NAVEGACION

Este es un radar que tiene aplicación en todos los aviones, no sólo los de combate.

Utiliza las características particulares del reflejo de la energía electromagnética que producen las masas acuosas en suspensión en la atmósfera, sean nubes, agua, hielo, nieve, etc. Como los reflejos (ecos) están relacionados con la humedad y temperatura de las moléculas de agua, además de su tamaño, resulta relativamente sencillo determinar las características de las nubosidades que se encuentran frente al avión.

El radar tiene el suficiente barrido a ambos lados como para mostrarle al piloto el mejor perfil de vuelo para evitar las áreas de mayor actividad meteórica o de conflicto a lo largo de la ruta.

Como este radar presenta una imagen que permite distinguir líneas costeras, islas, ríos, y ciertas conformaciones del terreno, se lo utiliza también como ayuda a la navegación.

Suelen trabajar en banda de 3 cm, con modulación por pulso y un alcance máximo de 300 km.

DE NAVEGACION DOPPLER

Ya prácticamente desaparecido, este radar tuvo una gran aplicación tanto civil como militar hace algunas décadas atrás, ya que era la solución para la navegación, hasta que se produjo el desarrollo del sistema inercial, y por el cual fue paulatinamente reemplazado, brinda información basada en el efecto doppler, pero no da imágenes; solamente mide la velocidad del avión con referencia al suelo y su deriva; estos dos datos permiten darle una precisión aceptable a la navegación.

Existen diferentes técnicas o modos para hacer las mediciones:

- Para medir la velocidad se puede utilizar:
 - Una antena montada en una plataforma estabilizada, con un haz único apuntado hacia abajo y delante del avión; al mantener un ángulo constante respecto al plano horizontal, un simple cálculo trigonométrico indica la velocidad.
 - Dos antenas solidarias con la estructura del avión, una apuntando su haz hacia abajo y adelante, y otra apuntándolo hacia abajo y atrás; las mediciones de ambos haces compensa el cabeceo y permite una medición precisa de la velocidad por doppler.
- Para medir la deriva se utilizan dos antenas con sus haces apuntados hacia abajo, adelante, y a ambos costados del avión; la comparación de las mediciones de ambos haces determina la deriva.

Lo normal es una antena de 4 haces (se puede imaginar como si fuera un trípode pero de 4 patas); la comparación de las mediciones de los 4 haces determina velocidad y deriva.

ALTIMETRO

Es un radar de onda continua modulado en frecuencia (FMCW), como el que describiéramos al principio; la medición del desplazamiento de la FM permite una muy buena medición en la precisión de altura.

PARA DETECCION DE OBSTACULOS

Este radar normalmente es usado abordo de helicópteros, ya que sirve para detección de obstáculos y evitar la colisión cuando se vuela bajo; para ser efectivo debe trabajar en frecuencias milimétricas, por lo que ya lo describimos al tratar el radar milimétrico.

DE COLA

En la época de la guerra fría los grandes bombarderos necesitaban tener un sistema de alerta por si algún avión, y sobre todo algún misil, se aproximaba por su sector trasero; los soviéticos en especial, recurrieron a un radar simple, normalmente doppler, que detectaba cualquier objeto que se aproximaba por su cola.

Radares para Búsqueda y Vigilancia Marítima

Mientras se experimentaba en la década 30 procurando desarrollar el radar, ya se habían hecho algunas pruebas que demostraban como factible usarlo para la detección de buques.

Así al llegar la Segunda Guerra Mundial se utilizaron algunos radares para detectar buques, incluso montados abordo de un avión para detectar submarinos emergidos.

DE BUSQUEDA SUPERFICIE

Así como antes vimos que los buques poseen radares para búsqueda "aire", también poseen otros de "búsqueda superficie", dedicados a la detección de buques e incluso misiles rasantes que tengan suficiente superficie reflectora.

Por supuesto las alturas de antena y blanco limitan enormemente los alcances posibles, cuyos máximos están en el orden de las 25/30 NM.

PARA PATRULLA MARITIMA

Esas limitaciones de altura de antena han llevado al desarrollo de plataformas sensoras aéreas, las que además de lograr aumentar enormemente el alcance de detección, pueden ser emplazadas adelantadas, brindándole a las flotas o buques

detección más allá del horizonte, y por lo tanto mayor CR.

Existe una gran variedad de plataformas, entre ellas VeNTri, helicópteros y aviones; algunos poseen sensores simples, ya que su objetivo es sólo aumentar el alcance de los sensores mediante el logro de altura.

Otros, como es el caso de los aviones de patrulla marítima, no sólo están equipados con radares, sino con todo tipo de sensores que permiten la detección de buques, misiles crucero y submarinos; y que ya no son utilizados para aumentar el alcance de los sensores para defensa de la flota o buque, sino que están concebidos para operar en la lejanía, operando muchas veces desde tierra (ej.: el P-3), procurando la detección y localización de las flotas o elementos del enemigo a la mayor distancia posible.

COSTEROS

Estos radares terrestres para detección de buques, siempre estuvieron emplazados en lugares claves, para asegurar la vigilancia y control de estrechos, fiordos, bahías, entradas a puertos, etc.

Ultimamente han tenido un nuevo auge debido al nuevo concepto "From the Sea" (desde el mar), de llevar a los buques a combatir en las aguas litorales para participar del combate terrestre.

PARA AYUDA AL TRAFICO MARITIMO

Son radares similares a los costeros, pero su aplicación es civil; normalmente están emplazados en ríos, puertos, o zonas costeras peligrosas. Ej.: una de las cadenas de radares más grande para el tránsito marítimo, la del puerto de Hamburgo a lo largo del río Elba.

PARA USO DE LAS PLATAFORMAS (BUQUES)

A lo largo de la descripción que venimos haciendo ya hemos mencionado los radares de búsqueda aire, búsqueda superficie, y los de las armas. Queda para mencionar el radar de navegación.

Estos radares están orientados a darle seguridad anticolidión al buque, ya que permiten la detección con el suficiente preaviso de otros buques o cualquier obstáculo, como costas, islotes, etc. que se encuentren próximos al buque.

DE VIGILANCIA EN SUBMARINOS

Cuando los submarinos emergen recurren a dos tipos de radares para alerta, uno de búsqueda aire, y otro de búsqueda superficie, limitados por supuesto a las posibilidades de tamaño de sus antenas y sobre todo a sus alturas.

Radars para Búsqueda y Vigilancia Terrestre

A estos radares los podemos agrupar en aquello:

- Aeroportados para la detección de blancos terrestres.
- Terrestres para detección de vehículos, personas y helicópteros.
- Terrestres para localización de morteros.
- Terrestres para seguridad de instalaciones.

AEROPORTADOS PARA LA DETECCION DE BLANCOS TERRESTRES

La reflexión que produce la superficie terrestre siempre ha sido un obstáculo para el uso de radares; a esto se sumaba la limitación de espacio abordo de las aeronaves como para poseer una antena de dimensiones adecuadas, por lo que durante muchos años los desarrollos se limitaron al SLAR, el que ya describimos al hablar de sensores de imagen y SAR.

Cuando la tecnología permitió reemplazar la película sensible por componentes de estado sólido, y al mismo tiempo se pudo medir con precisión el desplazamiento relativo sensor-blanco, y procesar todo esto; es decir, con el advenimiento del SAR en su variante **GMTI** (Ground Movil Target Indicator / indicador de blancos móviles terrestres), fue posible la detección y seguimiento de móviles terrestres, y por ende su marcación como blancos.

Esta tecnología tuvo un debut espectacular con el JSTARS durante la guerra del Golfo.

Desde allí en adelante los diferentes equipamientos se multiplicaron; constituyendo los únicos sensores aeroportados que brindan información sobre blancos terrestres en una extensa área.

Cabe recordar que aunque en el lenguaje común se habla de SAR, se debe distinguir entre dos modos de operación y capacidades diferentes, las que ya vimos al hablar del SAR en sensores de imagen:

- **GMTI**: Es la utilización del efecto doppler y otras características que provee este tipo de radares para detectar y localizar móviles sobre la superficie terrestre. Esta técnica no brinda una imagen, sólo la localización en coordenadas espaciales de blancos móviles individuales.
- **Imagen SAR**: Es un proceso mucho más complejo que el GMTI, y esta técnica **si** brinda una imagen de la superficie terrestre que va captando, representando todos los accidentes del terreno y los elementos superpuestos.

Aunque el más popular es el GMTI (SAR/GMTI) abordo del JSTARS, existen varios sistemas más simples, abordo de aviones y helicópteros, en pods para aviones de combate, o abordo de VenTri.

Desde ya las capacidades y prestaciones, sobre todo en superficie vigilada,

son completamente diferentes, pero todas están basadas en la medición del corrimiento doppler; y la descripción del GMTI que se hace en sensores de imagen es válida también para estos otros equipos.

TERRESTRES PARA DETECCIÓN DE VEHICULOS, PERSONAS Y HELICOPTEROS

A veces llamados "**combat radar**" (radar de combate), son radares sumamente sencillos, que pueden rotar para cubrir los 360° o barrer en forma sectorial, por ejemplo 180°; pueden estar montados en vehículos o ser transportados por un par de personas; y se basan en el efecto doppler para la detección; los más complejos recurren al doppler pulsado para poder obtener información de distancia y a la vez mejorar la discriminación y eliminación del clutter (empastamiento) producido por el terreno.

Para la presentación de la información pueden: utilizar una pantalla de plasma, recurrir a simples diodos colocados en forma radial para indicar la dirección, o los más sencillos, utilizar la frecuencia del corrimiento doppler transformándola en audible, permitiendo determinar el tipo de blanco por el tono de audio que se escucha, y que es función del corrimiento doppler particular de cada blanco detectado.

Sus alcances normalmente oscilan en:

- 5 a 15 km para personas
- 15 a 17 km para jeep
- 20 a 35 km para tanques y camiones
- 25 a 30 km para helicópteros.

TERRESTRES PARA LOCALIZACION DE MORTEROS Y ARTILLERIA

Estos radares están diseñados para captar la señal que refleja la munición de morteros, artillería y cohetes; y sobre la base de las coordenadas de la trayectoria que logra medir, determinar tanto el lugar de emplazamiento desde donde fue disparada, como el posible lugar de impacto.

Para hacerlo necesita medir al menos dos puntos de la trayectoria, lo que puede realizar utilizando dos lóbulos superpuestos en vertical, uno con un ángulo lo más bajo posible para detectar la munición apenas disparada, el otro con un cierto ángulo por arriba del primero.

Cuando el enemigo dispara su munición, ésta atraviesa el primer lóbulo determinando un punto en el espacio; al atravesar el segundo lóbulo, que puede ser el mismo primero al que se le varía su posición angular vertical (tilt), determina un segundo punto, y con ambos se puede aplicar un algoritmo simple que indicará con bastante precisión los lugares de disparo y de caída de la munición, tomando los puntos de cruce de los lóbulos como parte de la parábola

que describe la munición en su trayectoria.

Para hacer esto los lóbulos a utilizar tendrán una gran apertura horizontal, buscando cubrir la mayor superficie de terreno posible, pero al mismo tiempo estos lóbulos estarán divididos en sublóbulos para poder determinar el azimut con la mayor precisión posible.

Estos parámetros nos darán: la posición de la pieza de artillería, y el lugar probable donde hará impacto la munición.

Al respecto cabe aclarar que la munición de mortero tiene trayectorias parabólicas bastante precisas, lo que no sucede con la de artillería o los cohetes, salvo cuando se disparan por arriba de 45°, lo que exige algoritmos más complejos.

Estos radares utilizan doppler pulsado para discriminar los proyectiles entre el clutter del terreno, logrando alcances entre los 20 y 50 km, y una precisión de localización de aproximadamente 20 metros.

Para lograr buenas precisiones se necesitan 3 mediciones, ideal 4, en la rama de ascenso de la trayectoria.

Los radares más sofisticados permiten también medir ciertas características de la munición, con lo que, además de precisión, brindan información sobre el tipo de munición, discriminando entre la de artillería, mortero o cohetes.

TERRESTRES PARA SEGURIDAD DE INSTALACIONES

Son miniradares doppler instalados en los perímetros o el interior de instalaciones, para detectar cualquier tipo de intrusión. Su principal requerimiento es que el área a vigilar sea controlada para evitar las falsas alarmas, sobre todo producidas por animales sueltos.

Radares Para Detección de Misiles Balísticos

Actualmente la mayor parte de la detección de misiles balísticos está basada en sensores IR colocados en plataformas satelitales, como por ejemplo el **SBIRS** (Space Based IR System / sistema IR basado en el espacio), y hasta hace poco en radares de banda X abordo de los satélites DSP.

Pero cuando no se posee la posibilidad de contar con estas plataformas satelitales, como es, por ejemplo, el caso actual de Australia con su radar Jindivik, así como cuando apareció la amenaza de los misiles balísticos intercontinentales en las décadas 50 y 60 y aún no se poseía capacidad espacial, la única alternativa es el uso de radares que puedan ver a grandes distancias, mucho más allá del horizonte, y con este nombre **OTH** (Over The Horizon) se los conoce.

Se basan en el principio de la reflexión ionosférica de las ondas electromagnéticas, en forma similar a las comunicaciones por HF.

Para poder captar al misil, deben tener capacidad para colocar la suficiente

cantidad de energía sobre el misil en su trayectoria de ascenso luego del lanzamiento, lo que significa grandes distancias, y que se traduce en grandes estructuras de antenas, fijas y complejas.

Hay dos formas de poder detectar al misil y determinar los parámetros de su trayectoria:

- **OTH-B** (OTH Backscattering / OTH – reflejo devuelto): Funciona como un radar común, en donde la emisión transmitida es reflejada por el misil y captada por una antena receptora que está emplazada en el mismo lugar o en las proximidades de la antena transmisora.
- **OTH-F** (OTH Forward scattering / OTH - hacia adelante): Las antenas transmisora y receptora están emplazadas en lugares opuestos, dejando al lugar de posible lanzamiento de los misiles entre ambas. La emisión transmitida es captada continuamente por la antena receptora, recibiendo una señal de características casi constantes, sólo afectada por algunas variaciones en la propagación.

Cuando un misil balístico atraviesa el lóbulo de la transmisión, produce una variación característica en la señal recibida en el otro extremo (la estación receptora), que permite detectar el lanzamiento.

Aún cuando varios de estos radares todavía se mantienen operativos, las facilidades y capacidades que brindan los sensores abordo de satélites, en especial los SBIRS que recién mencionamos, están haciendo que este tipo de radares poco a poco vayan siendo desactivados por aquellos que ya poseen la capacidad abordo de satélites.

Radares Para Detección y Seguimiento de Satélites

El conocimiento de donde se encuentran en todo momento los satélites, especialmente aquellos de reconocimiento, es fundamental para saber qué es lo que puede estar captando nuestro enemigo o posible oponente.

Esta necesidad se satisface mediante radares que permiten la detección y seguimiento de los satélites.

La tarea no es sencilla, ya que además de los satélites hay una gran cantidad de restos en órbita, por lo que el mayor trabajo consiste en la identificación de cada elemento y la discriminación de aquellos satélites que nos interesan.

Por supuesto el espacio a cubrir es enorme, y es compleja la identificación, por lo que se necesitan suficientes radares con cubrimientos tales que abarquen todo el espacio que interesa.

Si estamos en la posición opuesta, necesitamos saber si nuestro oponente ha detectado e identificado a nuestros satélites, y si tiene capacidad para seguirlos.

Tanto una como otra información permitirán desarrollar técnicas y procedimientos, sea para degradar al enemigo, sea para protegernos.

En rasgos generales existen dos tipos de sensores para esta tarea. Uno basado en emisiones de onda continua, que permite determinar la dirección y la velocidad

radial de cada satélite detectado; con estas mediciones se puede determinar la órbita completa, y así correlacionarlo en sus órbitas siguientes.

Los del otro tipo son de baja frecuencia (UHF) con anchos de pulso de más de 2.000 μ seg y potencias picos mayores a 3 Mw; lo que les permite detectar blancos de 1 m² a 2.000 NM.

El radar no permite la identificación de los satélites detectados, pero a través de sus parámetros de órbita se los puede relacionar con los parámetros que obran en las bases de datos de UN presentados por los lanzadores.

Radar Meteorológico

Para su operación este radar se basa en la variación de los índices de refracción de la atmósfera, los cuales dependen de la distribución de temperatura y humedad respecto a la altura.

Según sean las características de propagación de la energía electromagnética, éstas permitirán el análisis y medición de las masas de agua presentes en la atmósfera (nubes, lluvia, hielo, nieve, etc).

Cuando analizamos las frecuencias ópticas, IR y milimétricas vimos los efectos de propagación, y sobre todo absorción, que producen las moléculas en suspensión; estos efectos también se producen en longitudes de onda mayores, en donde operan los radares meteorológicos.

Estas particularidades permiten la detección e identificación de:

- Nubes.
- Precipitaciones.
- Zonas de engelamiento (agua sobre enfriada).
- Cristales de hielo.
- Turbulencias.
- Actividades convectivas.
- Discriminación de áreas, tanto de gran actividad como de poca actividad.

Recurriendo a diferentes técnicas, por ejemplo las polarimétricas (variando la polaridad de la emisión), se puede distinguir entre diferentes tipos de precipitación, determinando el contenido de agua al medir la forma, alto y ancho de las gotas de agua en un específico volumen de aire; ya que por ejemplo, las gotas grandes tienden a aplanarse al caer, mientras que las gotas chicas tienden a mantenerse redondas.

Como las gotas de agua a detectar normalmente son aquellas de diámetro superior a los 100 μ , la longitud de onda que más rinde (detecta) cuando se procura información detallada para el uso aeronáutico es la de 8,6 mm; esta emisión radar debe ser complementada con otra en 5 a 10 cm para disponer de una información meteorológica completa y más extensa.

La suma de: la detección de las partículas de agua o hielo, más la zona de

transición o isoterma de 0°, más la temperatura y la humedad, factores que actúan en la refracción, dan el mayor resultado meteorológico; ya que permiten detectar e identificar, por las particularidades de los ecos y su comportamiento, las características y desplazamientos de las distintas masas.

El radar meteorológico puede estar abordo de plataformas terrestres o satelitales, lo que hará que la información entregada sea diferente, ya que es diferente el ángulo con el que el radar capta la reflexión de sus emisiones.

Radar de Seguimiento de Globos y Cohetes Sonda

Son radares similares a los de seguimiento de las armas superficie-aire, pero desde ya, diseñados para prestaciones civiles. A veces suele usarse para esta actividad radares de seguimiento de armas ya desactivados como tales..

Radar UWB

Aunque ya se hacía desde antes, después de la guerra del Golfo creció el ansia por cavar y enterrarse; esto llevó a otra ansia, la de detectar lo enterrado, renovando el interés en los radares UWB.

La tecnología **UWB** (Ultra Wide Band / banda ultra ancha) consiste en emitir pulsos de muy corta duración, menores a 2 nanosegundos, con muy baja potencia y con un ancho de banda extremadamente grande.

Aunque la teoría ya se conocía en los 60 y comenzó a desarrollarse a fines de la década 80, el hecho que utilizase las mismas bandas de frecuencia ya asignadas a otras emisiones puso resguardos a su empleo, basados en el temor a que interfiriese en la recepción de las otras emisiones, especialmente aquellas frecuencias asignadas a emergencias, actividades críticas como el tránsito aéreo, o las emisiones de TV.

Esto hizo que la autorización para su uso estuviera frenada, al menos oficialmente, en USA y Europa durante toda la década 90. Finalmente la FCC (Federal Communications Commission / Comisión Federal de Comunicaciones) de USA acaba de normar (22ABR02) sobre su empleo.

En el caso del radar UWB, que en sus comienzos fue denominado **MIR** (micropower Impulse Radar / radar de impulsos de micropotencia) por sus características, está orientado a la detección de objetos enterrados o que se encuentren detrás o en el interior de estructuras tales como paredes.

Las posibles aplicaciones de uso militar comprenden:

- Radar que penetra el terreno (**GPR** – Ground Penetration Radar): que permite detectar la ubicación, y presentar la imagen de objetos enterrados en el suelo.
- Equipos para detectar la ubicación o movimiento de personas u objetos que están colocados detrás de una estructura, por ejemplo una pared.

- Equipos para detectar y localizar objetos dentro de estructuras tales como paredes, estructuras de hormigón, puentes, etc.
- Radar para la protección de una determinada área, detectando el movimiento de personas u objetos que intenten la intrusión.

Se basa en el principio de reflexión de la energía por la subsuperficie del terreno en lugar de la superficie. En los radares normales la rugosidad de la superficie del terreno refleja y refracta la energía; si se logran evitar estos reflejos, lo que logra el UWB por lo extenso de su ancho de banda y lo estrecho de sus pulsos, la energía del radar será reflejada por la subsuperficie.

EL SISTEMA CARABAS

Hay una tendencia a confundir los radares UWB con aquellos que operan en frecuencias muy bajas, en el orden de los 100 MHz o menores, y que utilizan un gran ancho de banda, pero no son UWB.

Tal es el caso del CARABAS, un desarrollo sueco, basado en un SAR que, al operar por debajo de los 100 MHz, permite la penetración del follaje, detectando lo oculto bajo el mismo.

DETECCION DE PLATAFORMAS FURTIVAS

En algunos artículos se menciona la aplicación de los radares UWB para la detección de plataformas furtivas (stealth), pero se desconoce si se ha realizado alguna demostración con éxito.

Se basa en el concepto que, al emitir en un gran ancho de banda, las probabilidades que alguna parte de la plataforma coincida con alguna de las longitudes de onda emitidas aumenta. Su sumatoria permitiría detectarla a mayor distancia.

Radar Para Espoleta de Proximidad

Algunas espoletas de proximidad utilizan el efecto doppler para su activación. El sistema es sencillo y se basa en la medición del corrimiento doppler producido por el desplazamiento relativo munición-blanco; en el momento en que se están cruzando ambos el corrimiento se hace cero, activando la espoleta.

SENSORES PASIVOS DE SEÑALES O EMISIONES RADIO ELECTRICAS

SIGINT, y su subdivisión en ELINT y COMINT, ¿o EMINT?

La mayoría de los lectores han de estar familiarizados con la clasificación tradicional de SIGINT de las décadas 70 y 80, dividido en COMINT y ELINT; el

primero dedicado al análisis de todo lo que sea comunicaciones, comprendiendo tanto el contenido: la información o inteligencia, que se transmite, como las características de los equipos de comunicaciones; mientras que ELINT analiza todo lo que sea NOCOM, todo lo que no está incluido en COMINT.

Aún cuando se refería a NOCOM (todas las señales que NO sean de COMunicaciones), los usos y costumbres hacían que se pensase en ELINT como la parte de SIGINT dedicada a analizar radares. Esto probablemente debido a que en la mayoría de la bibliografía, cuando se hablaba de las amenazas sólo se consideraban los distintos tipos de radares.

Pero la tecnología ha hecho que tanto los radares como los equipos de comunicaciones evolucionen, y asimismo, que se les preste más atención a todas aquellas señales que no son ni radar ni comunicaciones.

Incluso la distribución de las emisiones dentro del espectro electromagnético estaba hecha más o menos según esos conceptos, y sólo eran utilizados los dos extremos del espectro, hasta 18 GHz en la parte baja, y luego una zona central sin aplicaciones, hasta llegar a las frecuencias IR.

Cuando se hablaba de radares, en ese entonces la tecnología imponía un límite superior en los 18 GHz, por arriba del cual sólo había algunos desarrollos de laboratorio y teorías, como sucede ahora con los radares UWB.

Si uno analizaba la distribución espectral, la mayoría de los radares estaban agrupados entre los 1 GHz y 9 GHz, e incluso era fácil determinar la aplicación operativa conociendo la frecuencia de operación.

La evolución posterior permitió primero llegar a los 40 GHz y desarrollar radares milimétricos entre 90 y 100 GHz, para, actualmente, cubrir desde los 40 a los 100 GHz, e incluso extenderse hasta los 300 GHz, abarcando completamente toda la parte del espectro a la que podemos llamar radioeléctrica.

Aquí conviene hacer una pequeña aclaración respecto al espectro y los equipos que lo utilizan, para facilitar la comprensión. Arbitrariamente podemos dividirlo en dos grandes agrupaciones:

- Desde aproximadamente los 3 KHz hasta los 300 GHz/1.000 μ . Comprende las partes del espectro que suelen denominarse: de radiofrecuencia, microondas, y milimétrico; en ellas los equipos, sean para transmitir (emitir) sean para recibir (captar) utilizan antenas.
- Desde los 300 GHz/1.000 μ hasta 1 PHz/0,1 μ ; comprendiendo las partes IR, óptica y UV; en donde las antenas son sustituidas por emisores y captadores de características particulares.

Esto hace que la forma de tratar y analizar las emisiones sea diferente en una y otra parte del espectro.

La tecnología también permitió un incremento de equipos y emisiones que son NOCOMunicaciones y también NORADar, pero que son sumamente importantes como para no analizarlas.

Estas emisiones son muy variadas, ya que comprenden por ejemplo las

señales de comando para el guiado de los misiles, las de comando para guiado de los VeNTri, las de IFF, de navegación y GPS, las radioayudas, etc; y las producidas en forma involuntaria por los equipos electrónicos o emitidas por los objetos.

Algunas estaban consideradas en los otros XXINT, como URINT, IRINT, LASINT, etc, pero aisladas en cierta forma del contexto SIGINT.

Si analizamos los equipos de comunicaciones, vemos que en ellos la evolución tecnológica ha sido mayor aún.

En la época del ELINT y COMINT, sólo se los encontraba como equipos independientes, la mayoría operando en las bandas de HF, VHF, y parte baja del UHF; y por arriba de los 500 MHz sólo se encontraban algunos equipamientos fijos, como las redes de microondas o los sistemas de dispersión troposférica; y el 90% de lo transmitido era voz.

Ahora cubren todo el espectro, desde pocos KHz hasta las frecuencias ópticas; pero sobre todo, evolucionaron notablemente en cuanto a las características de transmisión, las que se hicieron sumamente complejas y por tanto difíciles de analizar.

Volviendo a los radares, en ellos el clásico pulso o la onda continua también evolucionaron, haciendo que las características de las señales radar también sean complejas, así como las técnicas de transmisión utilizadas.

No sólo eso, sino que a la señal radar se le incorporó información, haciendo por ejemplo, que también cumpla funciones de IFF, al utilizar la codificación del pulso transmitido de forma tal que sirva como interrogador, y haciendo que el interrogado sobreimponga una modulación en el eco que devuelve, identificándose.

Igualmente, la señal de un radar de seguimiento puede ser modulada con los comandos para el guiado del misil.

El resultado es que actualmente, al captarse una señal, a la que podemos llamar moderna, resulta difícil determinar de entrada, por su complejidad, si es de radar, de comunicaciones, o de otro tipo, existiendo el riesgo que sea mal clasificada, e ignorada o eliminada porque se piense que no pertenece a la categoría que se está analizando.

Por eso resulta conveniente no trabajar las señales como de ELINT o de COMINT según los procedimientos clásicos, sino volver a los inicios, y tratar a todas las señales en forma común, hasta que se las haya reconocido y clasificado.

A esto obedece la clasificación, siempre arbitraria al efecto de la comprensión, que hemos hecho en:

- **Sensores de Señales o Emisiones.**
- **Sensores de Contenido.**

Los primeros consideran las señales o emisiones en sí, de todo tipo, sin considerar el contenido inteligente (información, datos o voz) que puedan poseer; y comprende:

- Radares.
- Comunicaciones (como meros transmisores).
- Todas las otras emisiones.

Los segundos; los sensores de contenido, se dedican a analizar detalladamente la información o inteligencia que está siendo transmitida, no importa cual sea el equipamiento o la parte del espectro que se utilice.

Los Sensores en Sí

Desde ya, a continuación no haremos un análisis detallado y profundo de todo lo referido al tipo de equipamiento, técnicas y procedimientos que se utilizan, pues ello nos llevaría a otro voluminoso estudio. Como la bibliografía disponible sobre el tema es abundante, nos dedicaremos a mencionar algunos aspectos interesantes que se deben considerar.

USOS

Uno de ellos es el uso posible a darle a este tipo de sensores; hay una tendencia a emplearlos para obtener información aplicable sólo a dos áreas:

- El OBE (Orden de Batalla Electrónico) del enemigo.
- Determinación o desarrollo de las CME a aplicar.

En realidad, los sensores de señal o emisión sirven para cumplir muchos otros roles, entre ellos:

- Como sensores del C² propio.
- Para degradar el C² del enemigo.
- Como sensores pasivos de la defensa aérea propia.
- Para degradar la defensa aérea del enemigo.
- A estos se agrega los clásicos para:
 - Desarrollar técnicas, procedimientos y equipos para CME, CCME, MAE y RWR o MWS.
 - Programar el equipamiento de autoprotección de los sistemas de armas.
 - Releva el OBE.

CATEGORIA DEL EQUIPAMIENTO

Cuando habitualmente se considera el equipamiento, se lo clasifica o agrupa en 3 categorías:

- **SIGINT**, o estratégico.
- **MAE**, o táctico.
- Para autoprotección, pudiendo ser:
 - **RWR** (Radar Warning Receiver / receptor de alerta radar).

- **MWS**, en sus dos acepciones:
 - **Missile Warning System** / sistema de alerta de misiles
 - **Multiple Warning System** / sistema de alerta múltiple, incluyendo el LWS.

Muchas veces sucede que los usuarios se autolimitan en el empleo de las capacidades que poseen estos equipos, ajustándose a esta clasificación aún cuando el equipamiento en sí posea una mayor capacidad.

Esto se da sobre todo con el equipamiento de última generación, ya que por ejemplo, un RWR actual tiene mucha más capacidad que un equipo ELINT de la década 70, pero como está categorizado como de autoprotección, algunos se resisten a utilizar las capacidades que posee para detectar y medir nuevas emisiones.

Por supuesto que los equipamientos están optimizados para cumplir con una de las tres funciones, pero no debemos autolimitarnos y usarlos sólo para ella; la inteligencia de emisiones o señales es un área en donde debemos aprovechar todo lo que el equipamiento y nuestro ingenio nos puedan dar, no importa la categoría del equipamiento; además, recordemos que a lo mejor esa es la única oportunidad en que podremos captar y medir a ese emisor.

Si no obstante queremos categorizarlos, podemos hacer la siguiente clasificación:

- Cuando detecta y mide nuevas emisiones, cumple funciones estratégicas.
- Cuando confirma y localiza, es empleado tácticamente.
- Cuando alerta y activa CME, es de autoprotección.

En la realidad, casi todos los equipos, en mayor o menor grado, pueden cumplir los tres requisitos.

Así como en el ejemplo anterior no debíamos autolimitarnos para usar un RWR para detectar y medir nuevas emisiones, tampoco debemos restringirnos en el empleo de equipamientos SIGINT en el campo táctico, o, si poseemos un adecuado enlace de comunicaciones con los sistemas de armas, usarlos para alertarlos de las amenazas. Recordemos que la información que se obtiene, cualquiera sea su fuente, debe ser distribuida en tiempo real a todos los que la necesitan.

SENSORES DE CONTENIDO

Como ya vimos al considerar los sensores de señales o emisiones, el CONTENIDO de las transmisiones ha crecido extraordinariamente en la última década, sobre todo porque hay un uso intensivo en el ámbito civil.

Todos sabemos que no pasa un día sin que escuchemos o leamos que estamos en la era de la información, todo es información; pero la información necesita transmitirse, y es aquí donde intervienen los sensores de contenido.

Como dijimos, hasta hace un poco más de una década todo era más fácil; la mayoría de las comunicaciones eran de voz, y aquellas de datos eran simples, muchas veces la sola modulación en amplitud o en frecuencia de una portadora; recordemos que el término "baudio" significaba "bit de audio", porque era un simple pulso utilizado para modular como si fuera audio.

El auge que tomó la comunicación entre computadoras, y la posibilidad de su uso civil con el advenimiento de Internet, más el hecho que cualquier persona puede usarla, produjeron una explosión en la cantidad de información que está circulando en un momento dado.

Para colmo, Internet no se quedó en el cable, pasó a los equipos de radio, inundando el espectro.

A esto debemos agregar la proliferación de teléfonos celulares, el uso intensivo de equipos de radio por empresas de taxis y de transporte, etc. etc.

El resultado: la saturación del espectro.

El verdadero problema: en medio de ese espectro completamente saturado debemos detectar y discriminar aquellas transmisiones cuyo contenido nos interesa.

Pero no todo termina acá; la necesidad de poder comunicar computadoras entre sí hizo que se crearan protocolos de comunicaciones, y que hubiese distintos niveles (levels o layers) en donde se aplican estos protocolos.

A ello debemos sumar el encriptado, que no es más de uso exclusivo de los militares o de las empresas importantes a nivel mundial; todo el mundo encripta.

Y uno no puede categorizar para descartar, debe analizar todo, porque lo más probable es que la información que busca sea transmitida por el oponente usando el más inocente de los medios.

Tampoco se puede discriminar entre equipamiento de uso militar y de uso civil; un buen sistema de telefonía celular actual equivale al **MSE** (Message Switching Equipment / equipo de distribución de mensajes) utilizado por USA en la guerra del Golfo. Los serbios por ejemplo hicieron un uso intensivo de ellos en el conflicto de Kosovo.

A ello debemos agregar que hay inteligencia contenida en cualquier otro tipo de transmisión NOCOM.

Como vemos, el sintonizar una frecuencia para escuchar la comunicación vocal de nuestro oponente está pasando a ser parte del romanticismo de la historia, como lo fue el pañuelo agitado por el viento en los combates aéreos.

El verdadero problema pasa ahora por el cribado de todas las emisiones para rescatar aquellas cuyo contenido nos interesa. Y aún cuando para hacerlo se poseen equipos poderosos y sofisticados, cada vez se depende más de operadores con gran capacidad e ingenio.

El Cable

Aún cuando el COMINT clásico, del cual deriva el análisis de contenido actual,

sólo se dedicó a comunicaciones en el espectro electromagnético, y el análisis de las comunicaciones por cable era realizado en forma separada, la tecnología ha llevado a que los contenidos, sea que se transmitan por cable o usando el espectro, sean los mismos; y utilicen los mismos protocolos, encriptados, etc.. Es más, incluso el encaminamiento de un contenido puede ser indistintamente por uno cualquiera de los medios, o utilizar ambos.

Por ello es conveniente agrupar todo lo que sea análisis de contenido; sea por cable o mediante el espectro electromagnético.

OTROS SENSORES FUERA DEL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

Aún cuando no los analizamos, debemos recordar que fuera del espectro electromagnético tenemos sensores:

- Acústicos.
- Sísmicos.
- De anomalías magnéticas.
- QBN, para detección de agentes químicos o bacteriológicos, y de detonaciones nucleares.

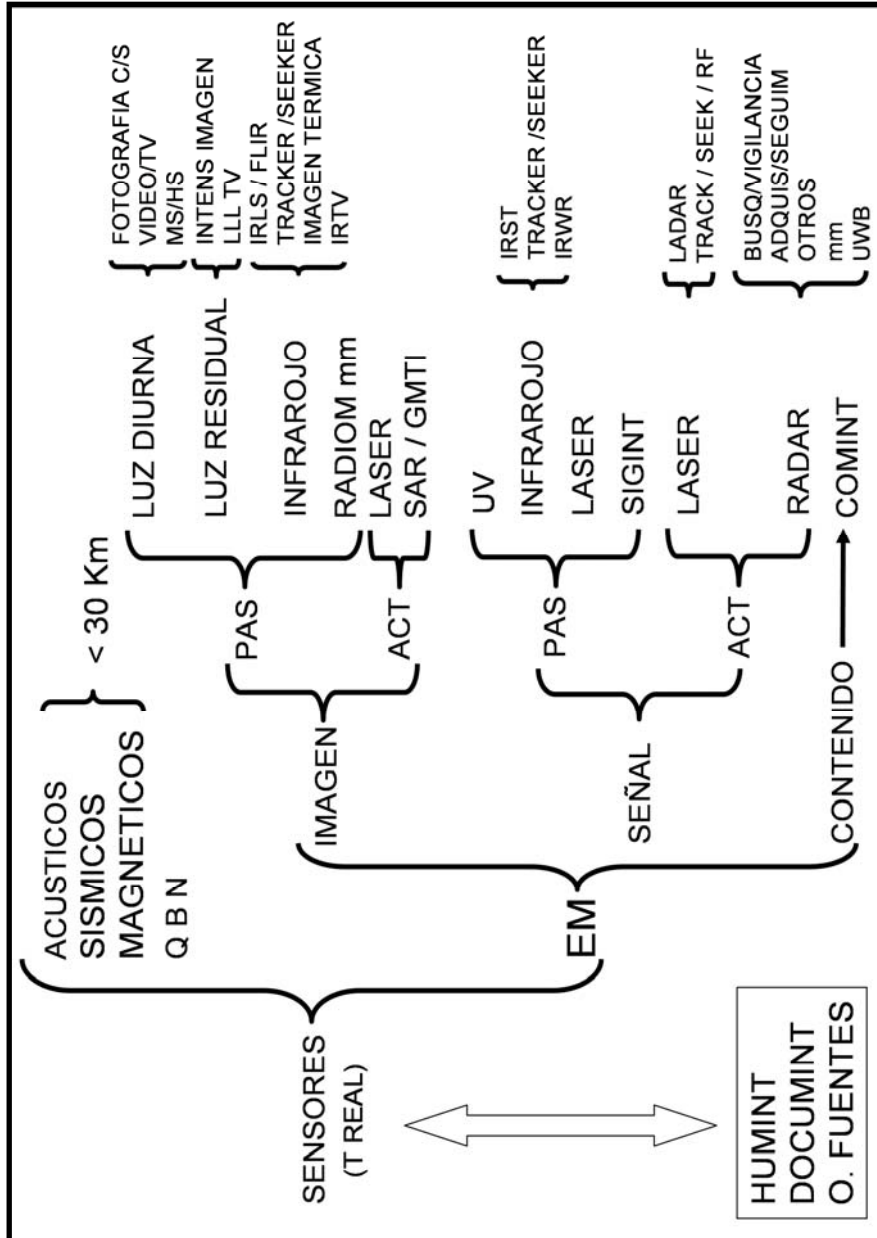


GRAFICO 11 - Los Medios de Obtención de Información

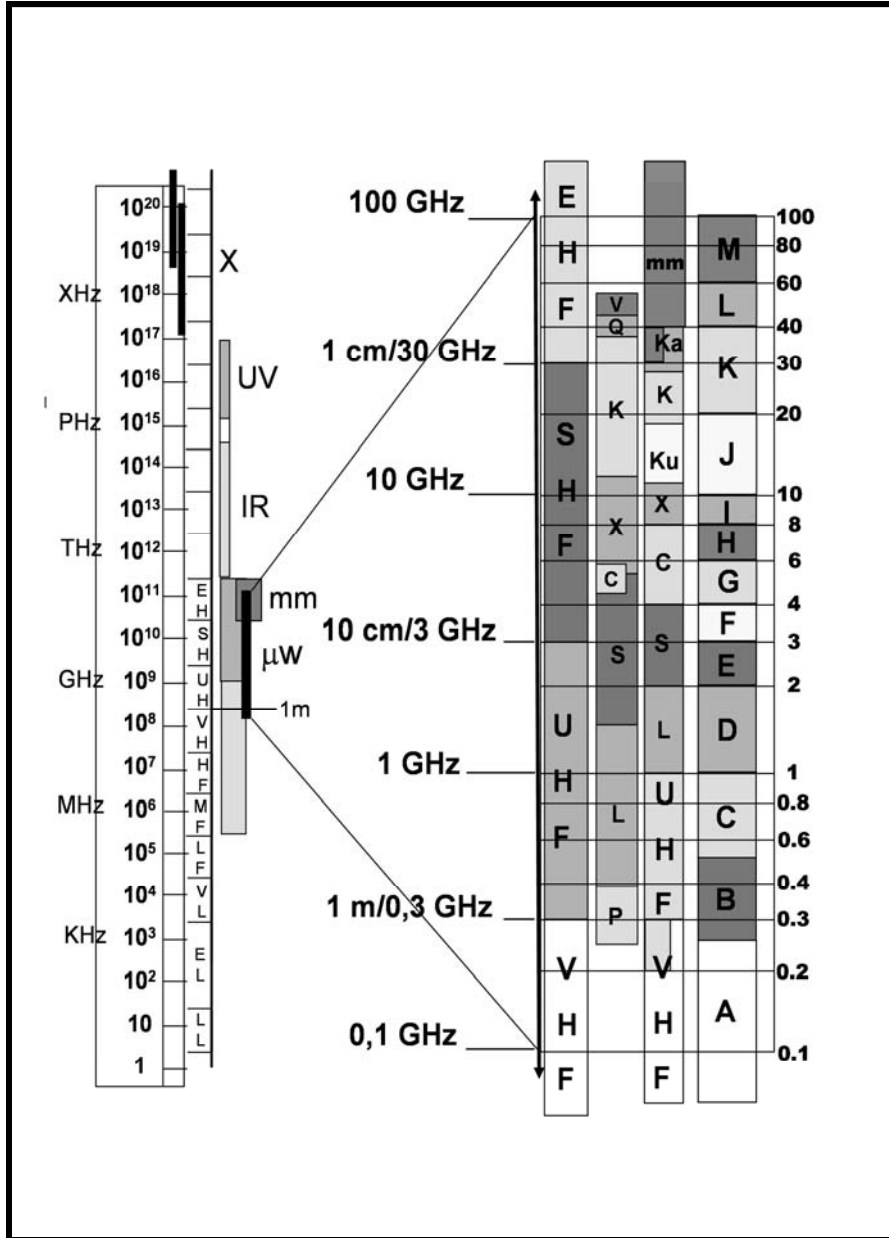


GRAFICO 13 - El Espectro de Radiofrecuencias

