

Tema 8

PRINCIPIOS BÁSICOS DEL RADAR



RADAR (Radio Detection and Ranging)

El Radar es un sistema electrónico por el cual se puede detectar la presencia de objetos o superficies, como así también su posición exacta y su movimiento, gracias a la propiedad que tienen la mayoría de los objetos de reflejar en su totalidad o en parte las ondas electromagnéticas.

TIPOS DE RADARES

Sistemas Pasivos:

Son aquellos en los que el objetivo a detectar “no está involucrado” en el proceso.

En este tipo de radares se pueden encontrar sistemas radar primarios de impulsos, utilizados en la vigilancia aérea.

Cuando la detección se lleva a cabo sin la cooperación activa del objetivo los sistemas se denominan “radares primarios” (PSR Primary Surveillance Radar).

Parte de la energía electromagnética que emite el radar a través de una antena direccional, se refleja en el blanco (aeronave), esta energía reflejada se capta a través de la misma antena.

TIPOS DE RADARES

Sistemas Activos:

Son aquellos en las que el objetivo a detectar está “activamente” involucrado en el proceso.

El equipo móvil, del que se desea conocer su posición y características, responde activamente a las interrogaciones que hace el equipo de tierra.

El equipamiento de a bordo se denomina “transpondedor”, debiendo estar activo para poder ser detectado.

En este tipo particular de radar se encuentran los radares secundarios utilizados en el control del tráfico aéreo.

El radar secundario SSR (Secondary Surveillance Radar) es una evolución del IFF (Identification Friend or Foe) militar.

Radar Primario

Ventajas:

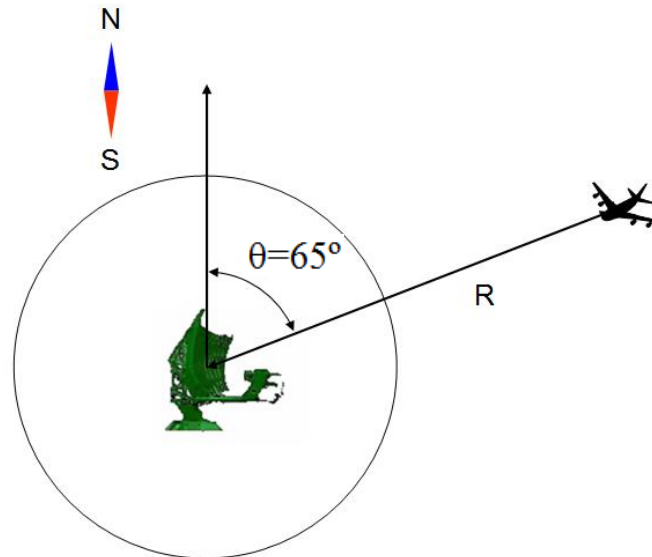
- Al ser un sistema no cooperativo no requiere de aviónica en la aeronave (transpondedor).
- Puede proporcionar información meteorológica.

Inconvenientes:

- No proporciona la identificación de la aeronave.
- No proporciona altitud de la aeronave.
- La posición está basada en la medida de tiempos, por lo que la distancia que calcula es la oblicua o línea de vista (Slant Range). Cuando se utiliza con sistemas SSR es necesario corregir la diferencia entre distancias horizontales y oblicuas mediante la altura de la aeronave proporcionada por otros sistemas.
- Presenta una alta probabilidad de detectar blancos falsos (vehículos de tierra, borrascas, aerogeneradores, pájaros etc.)
- Su coste es mucho mayor que el del radar de vigilancia secundario (SSR).
- Periodo de actualización entre 4 y 12 segundos, dependiente de la aplicación.
- Requiere una gran potencia de transmisión.
- No puede resolver dos blancos próximos debido a su mala resolución acimutal.

Funciones del Radar Primario

- ❑ Detectar blancos.
- ❑ Situarlos por medio de sus coordenadas.



El blanco queda situado mediante sus coordenadas polares R y θ .

Funciones del Radar Secundario

El blanco tiene que ser colaborador, la respuesta es activa. La aeronave tiene un equipo a bordo que responde a la interrogación con una respuesta adecuada.

FUNCIONES DE RADAR SECUNDARIO

- Detectar blancos.
- Situarlos por medio de sus coordenadas polares.
- Identificar el blanco (Modo A).
- Obtener el nivel de vuelo (Modo C).

Radar Secundario

Ventajas:

- Permite el envío de la identificación de la aeronave.
- Permite el envío de la altitud y de códigos de emergencia.
- Menos sensible al clutter y las condiciones meteorológicas.
- Corrección del error Slant range, por disponer de la altitud.

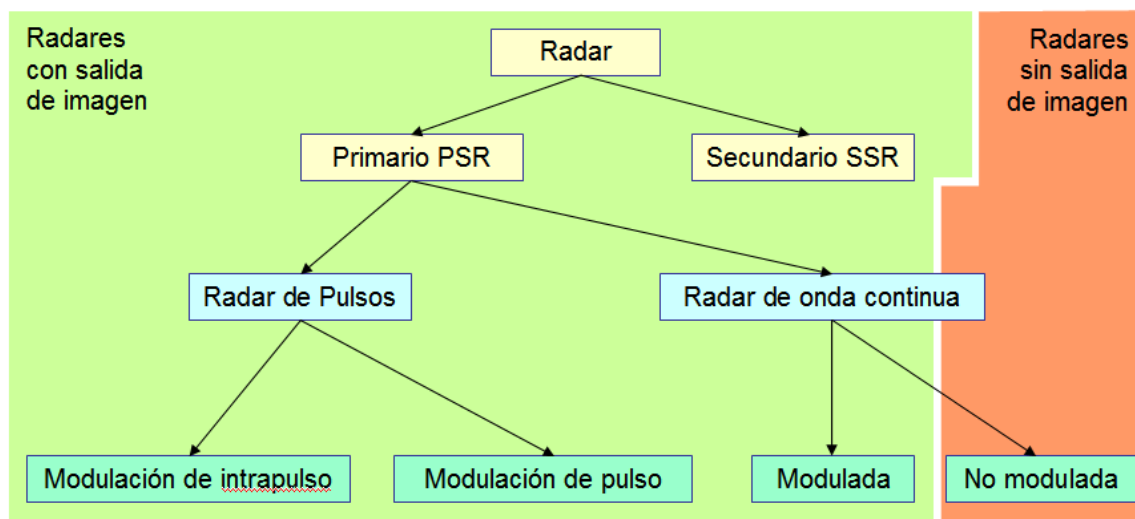
Inconvenientes:

- Mala resolución y precisión acimutal, en especial para el SSR clásico.
- Posibilidad de blancos falsos debido a reflexiones o multipath.
- Posibilidad de confusión entre respuestas modo A y modo C.
- Falta de detección de errores en la información de identidad y altitud.
- Sistemas caros de instalar y mantener.
- No puede resolver dos blancos próximos debido a su mala resolución acimutal.
- Dependiente de la aviónica de la aeronave.
- No son lo suficientemente precisos para aplicaciones de superficie.

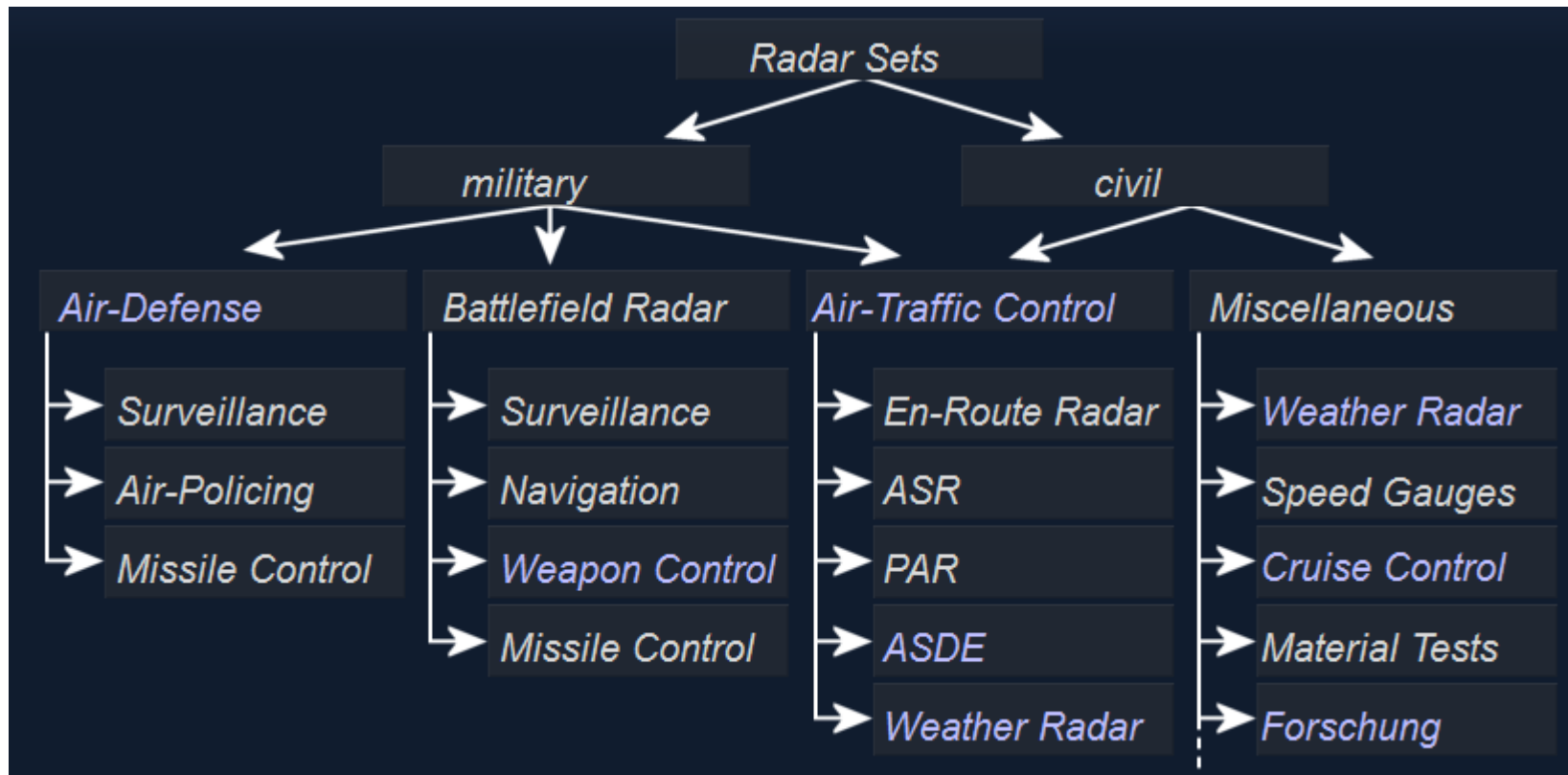
Tipos de radares según tecnología

Radares Primarios: CW (onda continua)
CW-FM (altimetría)
Pulse Radar (usado en ATC) Doppler

Radares Secundarios: SSR (usado en Aviación Civil)
SSR Monopulso (MSSR) (usado en aviación civil)



Tipos de radares según uso



Tipos de Radar

VIGILANCIA

Ruta Banda L – 200 NM.

Terminal Banda S – 60 NM.

Aeropuerto (SMR) Banda X – 10 NM.

Navegación Banda X – Navegación.

PAR

Radar de precisión para aproximación.

METEOROLOGICO

Banda X 20 NM.

ALTIMETRIA

Medición de altitud.

GCA

Ground-controlled approach, Integrado por un Radar de vigilancia de Área (ASR), y un PAR (de uso militar).

CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS RADAR

Se puede realizar también una clasificación general de los sistemas radar en función de una serie de particularidades y aplicaciones:

- A. Por el número de antenas.
- B. Por el tipo de blanco.
- C. Por la forma de onda.
- D. Por su finalidad.
- E. Por su ámbito de aplicación.
- F. Por la frecuencia de trabajo.
- G. Otras técnicas.

CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS RADAR

Según número de antenas:

- Monoestático:** una sola antena transmite y recibe.
- Biestático:** una antena transmite y otra recibe, en un mismo o diferente emplazamiento.
- Multiestático:** combina la información recibida por varias antenas.

Según el tipo de blanco:

- Radar Primario:** No necesita cooperación del blanco.
- Radar Secundario:** Necesita cooperación del blanco.

CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS RADAR

Según forma de onda:

- Radar de onda continua (CW):** Transmite sin interrupción una onda senoidal.
Los radares policiales suelen ser de onda continua y detectan velocidades usando el efecto Doppler.
- Radar de onda continua con modulación (CW-FM, CW-PM):** La portadora se modula en frecuencia o fase, con objeto de poder determinar cuándo se realizó la transmisión de una señal correspondiente a un eco (así se permiten estimar distancias).
- Radar de onda pulsada:** Es el funcionamiento normal. Se transmite un pulso periódico, de gran potencia, que puede o no estar modulado.

CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS RADAR

Según finalidad:

- Radar de seguimiento:** Es capaz de seguir el movimiento de un blanco.
Por ejemplo el radar de guiado misilístico.
- Radar de búsqueda:** Exploran el espacio, o un sector del mismo, mostrando todos los blancos que aparecen.

CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS RADAR

Por su ámbito de aplicación:

- Militar:** radares de detección terrestre, radares de misiles auto-propulsados, radares de artillería, radares de satélites para la observación Terrestre.
- Aeronáutico:** control de tráfico aéreo, guía de aproximación al aeropuerto, radares de navegación.
- Marítimo:** radar de navegación, radar anti-colisión.
- Meteorológico:** detección de precipitaciones (lluvia, nieve, granizo, formaciones de nubes).
- Circulación y seguridad en ruta:** control de velocidad de automóvil, radares de asistencia de frenado de urgencia.
- Científico:** en satélites para la observación de la Tierra, para observar el nivel de los océanos, encontrar restos arqueológicos, y otras observaciones de investigación.

CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS RADAR

Otras tecnologías:

- Radar tridimensional:** son capaces de determinar la altura del blanco, además de su posición sobre el plano.
- Radar de apertura sintética (SAR):** permite la obtención de imágenes del terreno similares a fotografías.
- Radares que operan utilizando la tecnología Ultra Wideband:** pueden detectar un humano a través de paredes, utilizando las propiedades reflectivas del humano.

CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS RADAR

Por la frecuencia de trabajo:

Nombre de la banda	Frecuencias	Longitudes de onda	Observaciones
HF	3-30 MHz	10-100 m	Radars de vigilancia costera, vigilancia OTH (over-the-horizon)
P	< 300 MHz	1 m+	'P' de "previo", aplicado de forma retrospectiva a los sistemas radar primitivos
VHF	50-330 MHz	0.9-6 m	Vigilancia a distancias muy elevadas, penetración en el terreno
UHF	300-1000 MHz	0.3-1 m	Vigilancia a distancias muy elevadas (ej: detección de misiles), penetración en el terreno y a través de la vegetación
L	1-2 GHz	15-30 cm	Distancias elevadas, control de tráfico en ruta
S	2-4 GHz	7.5-15 cm	Vigilancia a distancias intermedias. Control de tráfico en terminales. Condiciones meteorológicas a largas distancias
C	4-8 GHz	3.75-7.5 cm	Seguimiento a distancias elevadas. Meteorología
X	8-12 GHz	2.5-3.75 cm	Guía de misiles, meteorología, cartografía de resolución media, radares de superficie aeroportuarios. Seguimiento a distancias cortas
K_u	12-18 GHz	1.67-2.5 cm	Cartografía de alta resolución. Altimetros para satélites
K	18-27 GHz	1.11-1.67 cm	Absorción del vapor de agua. Se usa para meteorología, para detectar nubes. También para control de velocidad de motoristas.
K_a	27-40 GHz	0.75-1.11 cm	Cartografía de muy alta resolución vigilancia de aeropuertos. Usado para accionar cámaras para fotografiar matrículas de coches infractores
mm	40-300 GHz	7.5 mm - 1 mm	Banda milimétrica, se subdivide como sigue. Nota: la denominación de las bandas no está unánimemente aceptada.
Q	40-60 GHz	7.5 mm - 5 mm	Comunicaciones militares
V	50-75 GHz	6.0-4 mm	Absorbido por la atmósfera
E	60-90 GHz	6.0-3.33 mm	
W	75-110 GHz	2.7 - 4.0 mm	Se usa como sensor para vehículos autónomos experimentales, meteorología de alta resolución y tratamiento de imágenes.

FRECUENCIAS RADAR

Las bandas de radio de microondas se identifican por letras, aunque esta nomenclatura se originó en la 2ª guerra, todavía está en uso e incluso se ha extendido.

Las bandas más empleadas son las siguientes:

BANDA L:

Alrededor de 1000 MHz. (1215-1350 MHz), el equipo radar en esta banda se usa normalmente para vigilancia a larga distancia o ruta, y complementariamente para mejorar la cobertura en aproximación.

Las antenas son grandes debido a la baja frecuencia, pero el empleo de esta frecuencia permite buena penetración a través de nubes y precipitación, con poca interferencia de los elementos naturales.

El alcance es bueno y excede frecuentemente de 250 NM para aeronaves que vuelan a gran altitud.

FRECUENCIAS RADAR

BANDA S:

Alrededor de 3000 MHz. (2700-3300 MHz), con una longitud de onda 10 cm, esta es la banda escogida usualmente para vigilancia de aeródromo, puesto que permite un alcance razonable, entre 60-100 NM. En radares de vigilancia de aproximación, se pueden generar anchos de haz suficientemente estrechos que permiten el guiado de la aeronave hasta una distancia de dos millas náuticas.

Se emplea en aproximación y para mejorar cobertura en ruta.

FRECUENCIAS RADAR

BANDA X y K

La Banda X (8-12 GHz) y K (18-27 GHz), con longitudes de onda comprendidas entre 3 cm y 2 cm.

Mediante estas frecuencias es posible alcanzar anchos de haz aún más agudos que en la banda S.

El radar para aproximación de precisión funciona normalmente a estas frecuencias, permitiendo que las aproximaciones de los aviones sean controladas con seguridad hasta un cuarto de milla a partir del punto de contacto.

El funcionamiento del equipo en la banda X lo hace muy susceptible a ecos por precipitación, siendo adecuado para la detección de nubes. También se utiliza en sistemas anticolidión y control de movimientos en superficie.

FRECUENCIAS RADAR

BANDA Q:

40-60 GHz. (35000 MHz.) el equipo en esta banda es muy susceptible a las interferencias por precipitación y se emplea solamente en aplicaciones a distancias cortas.

No obstante, debido a la agudísima amplitud del haz que se consigue con antenas de tamaño moderado, es extraordinariamente adecuado para control de tierra de aeródromo.

Un ejemplo excelente es el equipo utilizado en el aeropuerto Heathrow de Londres, que es capaz de mostrar un hombre de pie sobre el aeródromo.

ECUACIÓN DEL RADAR

El alcance teórico máximo de un radar en el espacio libre se puede calcular en función de varios parámetros como la potencia de transmisión y la sensibilidad del receptor.

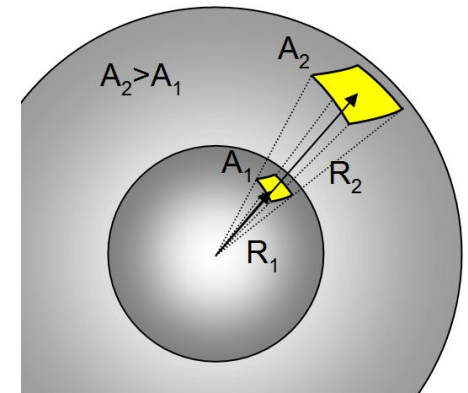
Si el radar emite una potencia P y la radiación es omnidireccional, en un punto alejado a una distancia R , tendremos una densidad de potencia igual a:

$$S[W / m^2] = \frac{P_t[W]}{4\pi R^2}$$

puesto que la potencia se habrá distribuido según una esfera con centro en el emisor y radio R .

Si la emisión se hace direccionalmente con ganancia G , en el punto situado a distancia R se tendrá como valor de la densidad de potencia:

$$S[W / m^2] = \frac{G \cdot P_t[W]}{4\pi R^2}$$



ECUACIÓN DEL RADAR

Supongamos que en el punto anterior existe un objeto de superficie σ , en consecuencia la potencia que recibe ese objeto será:

$$P_{blanco}[W] = \frac{\sigma \cdot G \cdot P_t[W]}{4\pi R^2}$$

Suponiendo que esta potencia es reflejada omnidireccionalmente, en la antena radar, se tendrá una densidad de potencia:

$$S[W / m^2] = \frac{\sigma \cdot G \cdot P_t[W]}{(4\pi R^2)^2}$$

La potencia total que captará la antena radar, cuya área efectiva la denominaremos A, será:

$$P_r[W] = \frac{A \cdot \sigma \cdot G \cdot P_t[W]}{(4\pi R^2)^2}$$

Es decir, la señal captada por el radar P_r , viene expresada por:

$$P_r[W] = \frac{A \cdot \sigma \cdot G \cdot P_t[W]}{(4\pi)^2 (R^2)^2}$$

ECUACIÓN DEL RADAR

Si la distancia **R** aumenta, el valor de la señal recibida disminuirá, de forma que la distancia o alcance máximo del radar será la correspondiente para el valor de la señal mínima detectable (sensibilidad del receptor).

Por tanto se puede escribir que:

$$(R_{\max}^2)^2 = \frac{A \cdot \sigma \cdot G \cdot P_t [W]}{(4\pi)^2 S_{\min}} \quad (1)$$

Como en los radares la antena emisora es la misma que la receptora, la ganancia en emisión es la misma que en recepción: $G_t = G_r = G$ y análogamente el área efectiva: $A_t = A_r = A$. Siendo la relación entre la ganancia y el área efectiva:

$$G = \frac{4\pi \cdot A}{\lambda^2}$$

ECUACIÓN DEL RADAR

Donde λ es la longitud de onda.

La ecuación **(1)** se podrá expresar, sustituyendo **G**, de la siguiente manera:

$$R_{\max}^4 = \frac{A^2 \cdot \sigma \cdot P_t [W]}{4\pi \lambda^2 S_{\min}} \quad R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{A^2 \cdot \sigma \cdot P_t [W]}{4\pi \lambda^2 S_{\min}}} \quad (2)$$

(2) Ecuación del radar en función del área efectiva y longitud de onda.
o bien sustituyendo **A** en función de la ganancia como:

$$R_{\max}^4 = \frac{G^2 \lambda^2 \cdot \sigma \cdot P_t [W]}{(4\pi)^3 S_{\min}} \quad R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{G^2 \lambda^2 \cdot \sigma \cdot P_t [W]}{(4\pi)^3 S_{\min}}} \quad (3)$$

(3) Ecuación del radar en función de la ganancia y longitud de onda.

ECUACIÓN DEL RADAR

La ecuación radar pone de manifiesto los parámetros intervinientes en el cálculo del alcance, sin embargo, este cálculo es aproximado.

La no exactitud se debe a diferentes factores como las pérdidas del sistema radar y factores aleatorios que se hacen presentes tanto en el valor del área radar, como en la señal recibida mínima, S_{\min} .

Por último, la ecuación radar en la práctica no se aplica en el espacio libre y deberán ser tenidos en cuenta los factores o atenuaciones atmosféricas y terrestres que afectan a la propagación de las señales.

DISTANCIA RADAR

Las características telemétricas del radar se basan en el conocimiento de la ley espacio-tiempo de propagación de la energía electromagnética.

Esta energía se propaga según trayectorias y leyes del movimiento que dependen de las condiciones del medio de propagación, definidas a estos efectos por su permeabilidad magnética (μ) y su constante dieléctrica (ϵ).

Las trayectorias dependen del índice de refracción (n) del medio, siendo:

$$n^2 = \mu_r \cdot \epsilon_r = (\mu/\mu_0)(\epsilon/\epsilon_0)$$

donde:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ henrios/metro} \quad \text{y} \quad \epsilon_0 = (1/36\pi) \cdot 10^{-9} \text{ faradios/metro.}$$

son la permeabilidad magnética y constante dieléctrica del espacio libre respectivamente.

DISTANCIA RADAR

En cuanto a la velocidad de propagación, su valor está también determinado por la permeabilidad magnética y constante dieléctrica del medio en que se realiza la propagación.

$$c^2 = 1/(\mu\epsilon) \quad \text{Velocidad de Propagación}$$

Obsérvese que la velocidad de propagación en el espacio real esta relacionada con la del espacio libre por el índice de refracción (**n**) según la expresión:

$$c = c_0/n$$

c_0 = velocidad de propagación en el espacio libre = $3 \cdot 10^8$ m/s.

DISTANCIA RADAR

Las trayectorias de propagación serán rectilíneas únicamente cuando sea constante el índice de refracción del medio (medio homogéneo), siendo también constante en este caso la velocidad de propagación.

Esto conduce a que la distancia radar solamente se determinará en forma aproximada, si se conoce el tiempo de propagación.

De aquí, que la distancia radar (x) se calcula mediante la expresión:

$$x = \frac{c_0 \cdot t}{2}$$

El camino (x) se recorre dos veces, una por la interrogación y otra por la reflexión o respuesta.

Aplicando el valor de c_0 y expresando el tiempo en microsegundos, resulta que la conversión de tiempos radar en distancias radar se realiza a razón de 150 metros por microsegundos. Este valor es el que se toma para la calibración de los indicadores de radar.

DIRECCIÓN RADAR

La directividad del radar se basa en el empleo de antenas extremadamente direccionables, capaces de concentrar el máximo de su energía electromagnética en un ángulo muy pequeño.

El comportamiento de una antena, en cuanto a la distribución de la energía electromagnética en el medio de propagación, se define por su función de ganancia, de la forma matemática:

$$g(\theta, \alpha)$$

ésta expresa para cada dirección representada por los ángulos acimutal (θ) y cenital (α), el valor relativo de la intensidad de radiación (U), y consecuentemente, la energía que responde a la dirección considerada.

PULSOS RADAR

La elección de la duración del pulso está condicionada por dos aspectos que, de alguna manera son contradictorios.

Por un lado, el pulso de radiofrecuencia tiene una amplitud máxima fijada de antemano, la energía contenida en el pulso será directamente proporcional a su duración.

En consecuencia, para obtener alcances elevados el valor de su duración temporal τ deberá ser grande.

Por otra parte, la resolución en distancia o poder separador del radar es tanto mejor cuanto más estrecho sea el pulso, ya que para que sean distinguidos entre sí dos objetos, es necesario que entre ambos exista una separación en distancia superior a:

$$\frac{\tau \cdot c_0}{2}$$

PULSOS RADAR

En la práctica estos condicionantes se optimizaron y dieron excelentes resultados, ya que en radares de alcance máximo reducido, generalmente es necesaria una buena resolución, mientras que en radares de largo alcance la resolución puede no tener demasiada importancia.

No obstante, cuando se desea reducir la duración del pulso en radares de alcance máximo elevado, se recurre a la técnica de la compresión de pulsos.