

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA A RESOLVER.

La falta de preparación especializada principalmente en las áreas de propagación y antenas hacen que el alumno recién egresado no cuente con los conocimientos requeridos por la industria aeronáutica haciéndolos menos competentes. En nuestro país los principales sistemas utilizados en el medio aeronáutico cuentan con sistemas totalmente computarizados los cuales están en constante desarrollo de ahí la importancia de capacitar a los alumnos en estas áreas.

1.2 OBJETIVO DE LA TESIS

El principal objetivo es presentar un material por escrito que brinde apoyo a los estudiantes de la carrera de INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES en las áreas de Propagación, Antenas, Dispositivos de Microondas y Sistemas de Microondas y sobre todo en las materias de nueva creación contempladas en la propuesta de la reforma curricular como son Sistemas de Radar y Comunicaciones Inalámbricas.

Es importante señalar que en la actualidad la Computación es una de las áreas de mayor crecimiento y evolución de ahí el interés de conocer sus aplicaciones en los sistemas de RADAR y RADIOAYUDAS para el Control de Tránsito Aéreo.

Con la intención de hacer un documento útil y práctico, se explicarán los principios de funcionamiento de cada uno de los sistemas.

1.3 HIPÓTESIS.

Consideramos que la deficiencia de la preparación en esta área es debida en parte a la escasa bibliografía que existe y además de que la información se encuentra muy dispersa. Esto aunado al rápido cambio de tecnología convierte en una odisea la constante actualización. Nuestro proposito es reunir en un solo tomo dicha información y ponerla al alcance de los alumnos de las actuales y próximas generaciones.

1.4 LÍMITES DEL ESTUDIO.

Ésta es una investigación completa de los distintos sistemas utilizados en el medio aeronáutico en el ámbito nacional para el control del transito aéreo. Incluye los primeros sistemas, mencionando los que actualmente se utilizan e inclusive la tendencia futurista. El estudio esta enfocado a los equipos que se utilizan en la actualidad y no en la investigación de nuevas tecnologías aplicadas al mismo propósito aunque se hace una visión a futuro.

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS

El transporte aéreo ha sido un factor fundamental para el desarrollo de las actividades productivas y comerciales de cualquier país. Debido a ello se diseñan sistemas de Comunicaciones, Radar y Radioayudas que permiten que la navegación sea segura y eficiente las 24 horas del día y todos los días del año.

Considerando el acelerado avance tecnológico en las áreas de electrónica, computación y las comunicaciones en el ámbito mundial y conscientes de que FIME no puede permanecer al margen de estos cambios hemos querido participar con esta aportación para apoyar a los programas de clase de la carrera de IEC.

1.6 METODOLOGÍA

Primeramente se explicarán los principios de funcionamiento de cada uno de los sistemas y se investigarán las nuevas tecnologías que están ofreciendo las industrias que fabrican estos sistemas. La información aquí expuesta esta basada en los manuales de operación de los equipos por lo que representa un punto de vista real.

1.7 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

El libro "Introduction to Radar system", de "Merril I. Skolnik", es una obra obligada de referencia prácticamente en cualquier tema de Radar. Es de destacar, fundamentalmente, la enorme claridad expositiva de la mayor parte de los temas expuestos, tratando siempre, en la medida de lo posible, reducir al mínimo la formulación matemática e intentando describir los sistemas desde un punto de vista intuitivo. Una de las principales carencias del texto es la ausencia de ejercicios o problemas que permitan al lector profundizar en la disciplina.

El texto "Radar Handbook", de "Merril I. Skolnik", es en realidad una recopilación en torno a los sistemas de Radar escrita por diferentes autores. En este texto el nivel de profundidad matemática es muy alto, sin dejar de lado la interpretación y la descripción del funcionamiento de los sistemas. Las principales ventajas son que resulta posible extraer temas de forma aislada ya que no sigue una línea continuada de exposición. El inconveniente es la ausencia de ejercicios.

El libro "Electronic Communication System", de "George Kennedy", es en realidad un libro para el área de comunicaciones, pero tiene un capítulo de Radar donde habla de los principales sistemas en forma clara. Por otro lado trae tres capítulos donde habla de dispositivos de microondas utilizados en sistemas de Radar. Estos capítulos son Guías de ondas y componentes, válvulas y dispositivos de estado sólido.

El libro "Understanding Microwaves", de "Allan W. Scoott". Es un libro que trae un capítulo para el tema de Radar, en este capítulo habla de los principios de funcionamiento de los distintos sistemas apoyándose con diagramas a bloques. El autor divide el libro en tres partes, las dos primeras partes habla de Fundamentos de Microondas y Dispositivos de microondas obviamente esos temas son aplicados a sistemas de Radar.

Del libro "Curso de Radar" de "M. Mataix", es una obra muy antigua y prácticamente lo rescatable de ésta, es el capítulo referente a la historia y desarrollo de los sistemas de radar.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE RADAR

2.1 INTRODUCCIÓN

El radar no es el trabajo de un solo hombre, ni tampoco es el desarrollo de una idea en particular, sino más bien es la culminación de muchas ideas y desarrollos del hombre. Las raíces del radar van tan profundo y se remontan hasta el mismo origen de la radio, puesto que el radar no es otra cosa mas que la radio, pero usada para otra cosa diferente que transmitir y recibir voces y música. La idea de la radiodetección se archivo en los primeros días de la radio y todo el esfuerzo y la atención se concentro en perfeccionar la radiodifusión y la recepción. No fue sino hasta los negros nubarrones de la II guerra mundial que se aproximaban, que se puso atención en el problema de la radiodetección. Fue entonces que se unieron los esfuerzos para trabajar arduamente en el radar como una arma defensiva.

La radiodetección no se ha conocido siempre como radar, sé llamo de diferentes maneras, hasta que él término RADAR se acuñó en Estados Unidos. En Inglaterra se le llamo RDF (Radio Direction Finding) localización direccional por radio y antes se la llamo RPF (Radio Position Finding) localización de posición por radio.

El radar es básicamente un medio, mediante el cual se reúne información acerca de un objeto distante o blanco (target). Se envían ondas electromagnéticas a ellos y se analizan los ecos.

La palabra RADAR es una contracción de “RADIO DETECTION AND RANGING” que quiere decir “DETECCIÓN Y SEGUIMIENTO POR RADIO” o “DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN POR RADIO”.

2.2 HISTORIA Y DESARROLLO

Decir cuando fue inventado el radar es una tarea prácticamente imposible. Anteriormente a la segunda guerra mundial, durante los años treinta, se habían desarrollado radares de pulsos en Estados Unidos, Inglaterra, Francia y Alemania. A este respecto es interesante consignar aquí el desarrollo del radar en Alemania, ya que, si bien del lado aliado existen múltiples publicaciones en las que se han consignado con gran detalle los éxitos y fracasos que les condujeron hasta la construcción de los primeros prototipos, del lado Alemán existe mucha menos información. Y si bien es cierto que durante la guerra los Alemanes perdieron la carrera emprendida en el desarrollo de esta técnica, también lo es que al comienzo de la guerra se hallaban posiblemente tan avanzados como sus futuros oponentes.

Los primeros experimentos sobre la obtención de ecos por reflexión de ondas electromagnéticas tuvieron lugar en Alemania en el año 1935. Que es, por otra parte, cuando el primer radar de tipo experimental sugerido por el físico escocés Robert Watson Watt para la detección de aeronaves fue instalado en una pequeña isla de la costa este de Inglaterra a fin de realizar los ensayos necesarios. La compañía Telefunken utilizaba ondas comprendidas entre los diez y los veinte metros y modulación de pulsos. En 1938 consiguieron por primera vez la localización de barcos, lo que dio lugar a la construcción en fábrica de las unidades del primer radar alemán, conocido con el nombre de <<Freya>>. La construcción la llevo a cabo la Casa Gema a instancia de la Marina de Guerra. Este radar trabajaba en 125 MHz (2.4 m) y la potencia de pico del pulso era de 20 kw. Mientras tanto, a partir de 1936 el Ministerio del Aire británico había comenzado la instalación de la cadena costera de radares, para la defensa del territorio, que se conoció con el nombre de <Chain Home>. Constaba de cinco estaciones, separadas unas veinticinco millas, que protegían el estuario del Támesis.

Estas estaciones acabaron de montarse en marzo de 1938. La Chain Home trabajaba en 25 MHz (12 m). A partir de entonces el esfuerzo inglés se orientó en dos

direcciones: la realización de un equipo para la detección de los barcos desde aviones y la de un equipo que permitiese a los aviones de caza atacar a los aviones enemigos durante la noche.

Al haber concentrado su esfuerzo en los radares de aviación, sobre todo el tipo de interceptación, llamado AI por las iniciales de las palabras inglesas Aircraft Interception, debe Inglaterra el fracaso de la ofensiva aérea alemana, que siguió a la ocupación de Francia. Los aviones de caza ingleses, dotados de los equipos de radar conseguían detectar y atacar con bastante anticipación a los bombarderos alemanes, de tal forma que las pérdidas de la Luftwaffe fueron tan elevadas que hicieron renunciar a la idea de invadir Inglaterra.

Al tratar de hacer un poco de historia del radar desde el lado alemán nos vemos obligados a simultanearla con la correspondiente historia del lado inglés, ya que, debido a los trágicos acontecimientos que tan rápidamente se avecindaban en los años treinta, ambos están estrechamente relacionados. Es curioso a este respecto una anécdota acaecida hacia 1937, en relación con el vuelo del dirigible alemán, Graf Zeppelin en viaje de propaganda por el Mar del Norte. Según se ha sabido después, el viaje no era fundamentalmente de propaganda; el dirigible iba equipado con varios receptores destinados a observar y estudiar las características de los radares ingleses, en especial para conocer la frecuencia en que trabajaba, lo que hubiese facilitado la tarea de interferirlos. El resultado del viaje fue totalmente negativo, pues a pesar del secreto mantenido de la parte alemana en cuanto a la misión encomendada, los ingleses no cayeron en la trampa y, según cuenta Churchill en sus Memorias, en aquellos días dio orden terminante a la Chain Home de guardar silencio absoluto.

Volvamos al lado alemán. El radar Freya servía para la Marina de Guerra pues permitía detectar otro navío a distancias comprendidas entre los 30 y los 60 Km. Pero para detectar la posición de un avión es preciso conocer su elevación, además de su distancia y demora. Para lo cual a su vez, es preciso hacer uso de antenas muy directivas. Ahora bien, una antena es tanto más directiva cuanto mayores son sus dimensiones respecto a la longitud de onda empleada o dicho de otro modo, para conseguir una gran

directividad con una antena de unas ciertas dimensiones es preciso reducir la longitud de onda de trabajo. La generación y recepción de frecuencias muy elevadas era en aquellos años, un problema de válvulas. Por esta razón los técnicos alemanes emprendieron la tarea de desarrollar válvulas de radar para longitudes de onda del orden de los 50 cm, llegando a conseguir un triodo de potencia que, trabajando en dicho margen producía una potencia de impulso de 10 kw. Estas válvulas sirvieron de base para la construcción, en 1940, del radar << Wurzburg >> que se utilizó para la dirección del tiro antiaéreo. En los años posteriores a 1940 este radar fue perfeccionado hasta que, finalmente, llegó a tener una precisión en la medida correspondiente a una esfera de 100 m de diámetro a una distancia de unos 30 km.

Los ingleses, por su parte, al concentrarse en la producción de un radar para uso a bordo de sus aviones, se dieron cuenta rápidamente que para tener los diagramas de radiación suficientemente estrechos que eran necesarios, con la limitación inevitable en las dimensiones de la antena, les era preciso utilizar longitudes de onda por debajo de 1.5 m que venían utilizando en los primeros radares de interceptación. Ello les llevó finalmente al desarrollo, en 1940, del magnetrón de cavidades, la válvula más importante en la historia del radar a la que alguien llegó a designar como << la válvula que ganó la guerra >>. La gloria corresponde a dos físicos ingleses de la Universidad de Birmingham, Boot y Randall, los cuales emprendieron la tarea de desarrollar una válvula que fuese un gran generador de microondas, partiendo del magnetrón de ánodo partido, inventado por el americano Albert W. Hull en 1921.

El magnetrón de cavidades permitió la generación de ondas de 3 cm dando lugar al desarrollo del radar de microondas, que fue lo que marcó la superioridad de los aliados en este dominio durante la guerra. Por otra parte, la separación se hizo más inevitable a partir del comienzo de las hostilidades con Rusia, pues entonces las autoridades alemanas dieron orden a sus laboratorios de no continuar las investigaciones emprendidas ni desarrollar otras válvulas o aparatos que aquellos que pudieran utilizarse en el frente en el plazo de un año. El resto de la historia vista desde el lado alemán es una cadena de frustraciones por parte del personal técnico implicado en esta lucha tecnológica. Citaremos algunos de los acontecimientos más notables.

A principios de 1943 un comando a bordo de lanchas rápidas inglesas consiguió

desembarcar en las costas francesas, entonces en poder alemán y capturar un radar del tipo <<Wurzberg>>, en el que se basaba la defensa antiaérea alemana. Como consecuencia de ello los aliados pudieron conocer sus características y planear el modo de interferirlo. Así, en agosto del año 1943, en un bombardeo de Hamburgo, pusieron en práctica por primera vez los aliados el sistema de interferencia que se conoció con el nombre de << window>>, consistente en unas pequeñas tiras metálicas de longitud igual a la mitad de la longitud del radar que se quería interferir. Estas tiras metálicas eran arrojadas en grandes cantidades por los aviones aliados que llevaban la misión de bombardear Hamburgo. Durante su prolongada caída, ya que su peso era mínimo, se comportaban como, dipolos resonantes, dando lugar a múltiples ecos semejantes a los de los propios aviones y que enmascaraban a éstos, haciendo inútil el uso del radar <<Wurzberg>> de la defensa antiaérea. También se utilizó la interferencia directa mediante potentes emisores desde la costa inglesa, para lo cual se desarrolló una válvula triodo de gran potencia que se conoció con el nombre de resnatron .

Al quedar mermada en su eficacia la artillería antiaérea alemana, se vieron precisados a tratar de desarrollar un radar para su uso a bordo de los aviones de caza. Así tuvo nacimiento el radar “Lichtenstein SN2” que trabajaba en 2.3 m. Esto sucedía hacia finales de 1943, nótese ya cuan grande era la distancia tecnológica que separaba a los alemanes de las potencias enemigas. la puesta en funcionamiento de este radar fue, al menos, un gran éxito; en una sola noche consiguieron derribar mas de 50 aviones enemigos, con la consecuencia de que los bombardeos cesaron durante varios meses. Pero a fines de 1943 los aliados consiguieron interferirlo en la misma forma que lo habían hecho con el “Wurzberg” . Finalmente, al comenzar 1944 es cuando los alemanes tuvieron la constatación del gran retraso que les había supuesto la falta de visión clara del alto mando al parar las investigaciones. Estos encontraron en un avión americano un equipo de radar de microondas operando a 3 cm. y se enteraron de la existencia del magnetrón, del klystron y del duplexor. Al final de la guerra, los técnicos alemanes sólo pudieron esforzarse en tratar de reproducir el material aliado, pero con la convicción de que era ya demasiado tarde y la partida estaba perdida.

Tras esta breve exposición de la historia vista del lado alemán, a revisar cómo se desarrolló en el lado aliado o, mejor dicho, en los Estados Unidos, tal y como ha contado R.M. Page, del Laboratorio de Investigación Naval, de Washington quien, en 1934, realizó el primer radar de impulsos para detección de aviones, por el cual se hizo acreedor a la recompensa por Servicios Civiles Distinguidos, de la Marina de los Estados Unidos.

Indudablemente, para poder decidir sobre cual fue el primer radar es preciso, ante todo, determinar las características que son propias del radar, faltando algunas de las cuales no puede estrictamente llamarse radar a un equipo electrónico que haga uso de las restantes. Son las siguientes:

1. Que se usa radiación electromagnética de alta radiofrecuencia para detectar objetos remotos reflejantes.
2. Que la radiación sea enviada en impulsos de, a lo sumo unos cuantos microsegundos de duración, separados por intervalos de <<silencio>> de duración muy superior .
3. Que los impulsos que son devueltos por los objetos reflejantes sean detectados y presentados por equipo receptor situado en el punto de transmisión.
4. Que la distancia se determine midiendo en términos de una unidad de tiempo tipo, independiente, el tiempo de vuelo de los impulsos hasta el blanco y retorno.
5. Que la dirección se determine mediante el uso de antenas de radio altamente directivas.

Sería muy largo citar todas las contribuciones de alguna importancia que han intervenido desde los primeros experimentos de Heinrich Hertz en 1886, en los que puso de manifiesto la existencia de las ondas electromagnéticas , vistas años antes por Clerk Maxwell partiendo de razonamientos teóricos. Hertz demostró asimismo que dichas ondas eran reflejadas por los objetos sólidos que encontraban a su paso. Por su parte Appleton y Barnet utilizaron ondas electromagnéticas para medir la altura de la

ionosfera, pero su método hacía uso de un interferómetro para apreciar el desfase que se producía por la distinta longitud de los caminos seguidos por las ondas directas y las reflejadas en la ionosfera. Breit, Tuve y Taylor también midieron la altura de la ionosfera mediante ondas electromagnéticas, utilizando esta vez impulsos y apresiando el tiempo de vuelo entre dos puntos de radio directo y el reflejado. Breit y Tuve en sus trabajos, así como ingenieros de la Post Office británica y de los laboratorios de la Bell Telephone americana habían observado, en diversas experiencias, que los aviones volando próximos a sus receptores o transmisores creaban notables perturbaciones en la propagación de campo, pero en aquel tiempo no se le concedió importancia, considerándose simplemente como interferencia.

Anteriormente a los trabajos citados hubo otros muchos de gran interés entre los cuales queremos citar uno, por haber sido considerado por algunos autores como el primer radar ya que se trataba de una parte registrada en Alemania, por un ingeniero llamado Huelsmeyer, sobre un dispositivo anticolidión para buques, basado en la transmisión y recepción de ondas continuas de muy alta frecuencia. El transmisor y el receptor iban montados en el mismo barco, pero separados cuanto era posible. De acuerdo con las cinco condiciones que hemos tomado como básicas es claro que el dispositivo no cumplía las números 2 y 3.

El primer incidente que condujo últimamente a la invención del radar fue la observación accidental por Taylor y Young, del laboratorio de Investigación Naval, en septiembre de 1922, que un barco interrumpía ciertas comunicaciones experimentales que estaban llevando a cabo a través del Potomac. Taylor y Young llevaban muchos años al servicio de la Marina y tenían muy presente el problema de apantallar las fuerzas navales contra la posibilidad de penetración por otros barcos en la oscuridad o con niebla. Este incidente fue el que les hizo comenzar a pensar en términos de detección de objetos móviles por radio.

Hubo algún otro incidente casual que, con el ya reseñado, al final dieron lugar al establecimiento en la Naval Research Laboratory, en enero de 1931, de un proyecto para <<Detección de aviones y barcos enemigos por radio>>. El trabajo en este proyecto continuó durante varios años. Se empleaba un método de batido en onda continua, El receptor y transmisor estaban ampliamente separados. Ello limitaba su utilidad en el

caso de buques por lo que terminó abandonándose este proyecto al Ejército. A raíz de esta transferencia en la responsabilidad del proyecto el interés de la Marina en el problema decreció, hasta que Yuong propuso a Taylor que se ensayase el método de pulsos. La propuesta combinaba las cinco condiciones citadas anteriormente y fue aceptado por Taylor quien asignó a R.M. Page para este trabajo. Su tarea comenzó el 14 de marzo bajo la supervisión de Young.

Es curioso reseñar los pasos principales en el desarrollo del equipo. Lo primero era conseguir un indicador para representar las salidas del transmisor y receptor. Para ello se diseñó un circuito de barrido que se aplicó a un tubo de rayos catódicos de cinco pulgadas, de producción comercial. seguidamente había que desarrollar un transmisor de pulsos. Se eligió la frecuencia de 60 MHz porque era la que se había utilizado en el método de batido. La longitud del impulso era algo menos de 10 μ s, y el intervalo entre impulsos, 100 μ s. Como modulador se utilizó un multivibrador asimétrico. La antena era un dipolo sencillo horizontal, con un reflector. La potencia del pulso entre 100 y 200 Watts. Para probarlo se tomó prestado un receptor experimental de comunicaciones, de banda ancha y elevada ganancia, el cual se conectó a una segunda antena similar a la utilizada como transmisor. El ensayo se realizó en diciembre de 1934 y dio resultado positivo con un avión volando a distancia de una milla, por lo que se inició inmediatamente el diseño de un receptor especial que eliminase ciertos inconvenientes técnicos que surgían de haber utilizado un receptor normal de comunicaciones. El receptor se proyectó para un impulso de 5 μ s y su ganancia era tal que el ruido térmico de la entrada del receptor se hacía claramente visible en la pantalla. Se rediseñó también el transmisor, el cual se conectó a una antena compuesta por una formación de dipolos. La antena receptora siguió siendo un dipolo sencillo con un reflector. La frecuencia de trabajo se cambió a 28.6 MHz y la frecuencia de repetición de los pulsos a 3720 p.p.s. El sistema comenzó a funcionar en abril de 1936 y se obtuvieron ecos muy claros de aviones hasta el límite de 25 millas del indicador.

El espectacular éxito obtenido hizo que se intensificase El esfuerzo para mejorar El diseño. La antena para la frecuencia de trabajo de 28.6 MHz era un cuadrado de unos 60m de lado. Como no convenía reducir la directividad de la antena pero sí sus

dimensiones, se elogió una frecuencia de trabajo mas elevada. El 22 de julio de 1936 se puso en funcionamiento un radar más pequeño trabajando en 200 MHz. Ese mismo mes se ensayó con éxito el primer duplexor . Este rápido desarrollo hizo posible el instalar un radar a bordo del destructor USS Leary, en abril de 1937, para ensayarlo en la mar. El éxito de estos ensayos codujeron al desarrollo del modelo *XAF*, para servicio naval. Una extensa serie de ensayos a bordo del USS Nuw York, en 1937, pusieron de manifiesto su valor operacional. El *XAF* constituyó el prototipo para el modelo *CXAM*, el cual estuvo en servicio a bordo de 19 barcos de los Estados Unidos al producirse el ataque japonés a Pearl Harbour el 7 de diciembre de 1941.

El desarrollo que hemos indicado tuvo lugar entre los años 1922, fecha de la observación casual de Taylor y Young sobre la interferencia de un buque en el río Potomac, y 1941. Hasta el verano de 1935 estos desarrollos tubieron lugar únicamente en los Estados Unidos. En aquella fecha una propuesta de Watson-Walt, en el mes de febrero, dio lugar al desarrollo del radar en Inglaterra, bajo el patrocinio de las Reales Fuerzas Aéreas, y a la cual hemos hecho referencia en repetidas ocasiones. El desarrollo en los Estados Unidos e Inglaterra fue completamente independiente hata el año 1940, en cuyo momento los dos países aunaron sus recursos. En este comercio tecnológico los Estados Unidos ganaron el conocimiento del magnetrón de cavidades, e Inglaterra, en contrapartida, el duplexor americano. A partir de este momento los grandes recursos para la producción en masa, típicos de la industria americana, hicieron que durante la guerra la mayor parte del material radar fuera fabricado en aquel país. A fines de junio de 1945, equipos de radar por valor de dos mil setecientos millones de dólares habían sido entregados al Ejército y a la Marina.

2.3 PROPÓSITO DEL RADAR

El propósito del radar es:

- Detectar la presencia de un blanco

- Determinar donde esta el blanco (rango, azimut ,etc.)
- Determinar que tan rápido se mueve el blanco
- Determinar “si es posible” de que blanco se trata.

En la figura 2.1 se muestra el principio de operación de un radar.

- 1.- El radar transmite una señal de microondas
- 2.- La señal de microondas es reflejada por el blanco
- 3.- El radar compara la señal reflejada con la señal transmitida para determinar la posición del blanco.

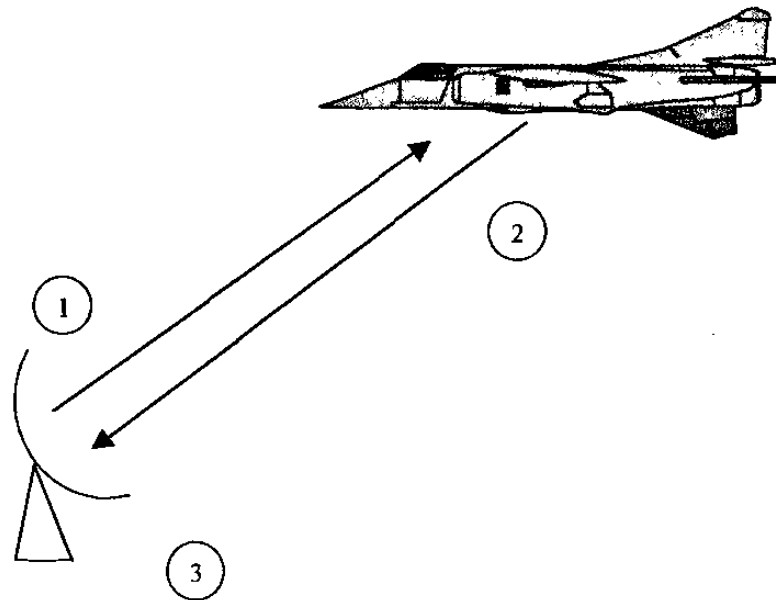


Fig. 2.1 Propósito del Radar

2.4 APLICACIONES

El desarrollo del radar fue durante la segunda guerra mundial, una vez concluida esta, se siguió investigando en otras aplicaciones tales como:

- Radar de policía
- Radar para control de tránsito aéreo

- Radar para la marina
- Radar meteorológico
- Guía de misiles
- Guía de terreno
- Radares de superficie
- Alarmas de intrusión
- Altimetros
- Acoplamiento espaciales
- Radares de exploración
- Guía de barcos en los muelles

2.5 BANDAS DE FRECUENCIAS ASIGNADAS

A continuación se da una tabla de las frecuencias utilizadas en los sistemas de radar y del nombre de las bandas.

Nombre de la banda	Rango de frecuencia en GHz.
UHF	0.3 – 1.0
L	1.0 – 1.5
S	1.5 – 3.9
C	3.9 – 8.0
X	8.0 – 12.5
Ku	12,5 – 18.0
K	18.0 – 26.5
Ka	26.5 – 40.0
V	40.0 – 80.0
N	80.0 – 170
A	Arriba de 170

La designación anterior es americana a continuación se da una asignación utilizada por la OTAN (Organización del Tratado del Atlántico Norte).

A	0	250	MHz
B	250	500	MHz
C	.50	1.0	GHz
D	1.0	2.0	GHz
E	2.0	3.0	GHz
F	3.0	4.0	GHz
G	4.0	6.0	GHz
H	6.0	8.0	GHz
I	8.0	10.0	GHz
J	10.0	20.0	GHz
K	20.0	40.0	GHz
L	40.0	60.0	GHz
M	60.0	100.0	GHz

2.6 ECUACIÓN DE RANGO RADAR

Para determinar el máximo rango de un radar, es necesario determinar la potencia de los ecos recibidos y comparar con la mínima potencia que el receptor puede manejar y exhibir satisfactoriamente. Si la potencia del pulso transmitido es P_t (potencia pico) y la antena es isotrópica, entonces la Densidad de potencia a una distancia r esta dada por la siguiente relación

$$DP = P_t / 4 \pi r^2$$

Sin embargo las antenas utilizadas en radar son direccionales. Si A_p es la ganancia máxima en potencia de la antena transmisora, la densidad de potencia DP en el blanco será.

$$DP = P_t A_p / 4\pi r^2$$

La potencia interceptada por el blanco depende del área efectiva del mismo, si esta área es S la potencia incidente PI sobre el blanco será.

$$PI = DP S = P_t A_p S / 4\pi r^2$$

El blanco no es, por supuesto una antena; así, que su radiación puede ser omnidireccional de acuerdo a esto la densidad de potencia DP' en la antena receptora esta dada por.

$$DP' = PI / 4\pi r^2 = P_t A_p S / (4\pi r)^4$$

La antena receptora intercepta una porción de la potencia reflejada la cual es proporcional a el área de captura de la antena. La potencia recibida P es:

$$P = DP' A_0 = P_t A_p S A_0 / (4\pi r)^4$$

Donde A_0 es el área de captura de la antena receptora.

Si (como es el caso usualmente) la misma antena es utilizada para transmisión y recepción , y la ganancia de la antena es:

$$A_p = 4\pi A_0 / \lambda^2$$

Sustituyendo y asumiendo que $A_p = 6(D/\lambda)^2$ queda:

$$P = P_t A_0^2 S / 4\pi(r)^4 \lambda^2$$

El rango máximo es obtenido cuando la potencia recibida es igual a la potencia mínima del receptor sustituyendo esto en la ecuación y despejando r nos queda:

$$r_{\max} = (P_t A_0^2 S / 4\pi \lambda^2 P_{\min})^{1/4}$$

Sustituyendo A_0 en función de A_p el rango máximo queda:

$$r_{\max} = [P_t A_p^2 \lambda^2 S / (4\pi)^3 P_{\min}]^{1/4}$$

Las últimas dos ecuaciones representan dos formas convenientes de la ecuación de rango radar.

2.7 RADAR DE ONDA CONTINUA (C W)

Su funcionamiento se basa en el efecto Doppler y se utiliza para medir la velocidad de blancos en movimiento, utilizando la energía reflejada en el blanco.

La ecuación que rige el principio de funcionamiento de este tipo de radar es la siguiente.

$$f_d = 2v_r / \lambda$$

Donde: f_d = Frecuencia de corrimiento Doppler

v_r = Velocidad radial del blanco

λ = Longitud de onda

Si: $\lambda = c / f_t$

$c = 3 \times 10^8$ m/s

f_t = frecuencia de transmisión

$$f_d = 2v_r f_t / c$$

Ejemplo. Considere un radar de onda continua operando a una frecuencia de 5 Ghz, calcule la frecuencia doppler para un radar estacionario cuando la velocidad radial del blanco es de 100km/h(62.5 mph)

$$\lambda = 3 \times 10^8 / 5 \times 10^9$$

$$\lambda = 0.06 \text{ m}$$

$$v_r = 100 \times 10^3 / 60 \times 60$$

$$v_r = 27.8 \text{ m/s}$$

$$f_d = 2 \times 27.8 / 0.06$$

$$f_d = 927 \text{ Hz}$$

En caso de que el blanco no se mueva en forma radial la ecuación quedaría de la siguiente forma.

$$f_d = 2 v \cos\theta / \lambda$$

Donde v es la velocidad del blanco y θ es el ángulo que forma con la radial como se muestra en la figura 2.2

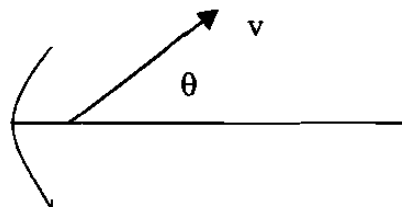


Fig.2.2 Velocidad del blanco no radial

En la figura 2.3 se muestra un diagrama a bloques de un radar simple de onda continua, donde un circulador es usado para proporcionar aislamiento entre el transmisor y receptor. Debido a que los niveles típicos de aislamiento de los circuladores andan alrededor de 30 dB una porción de la señal transmitida escapa hacia el detector y esta es

mezclada con la energía reflejada por el blanco dando como resultado de la mezcla la frecuencia doppler. Esta frecuencia doppler es amplificada y mostrada en un contador de frecuencia calibrado en kph o mph.

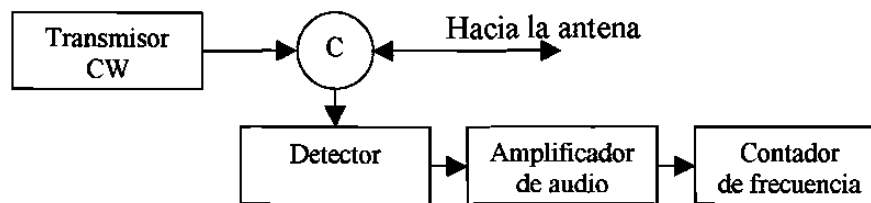


Fig. 2.3 Radar de CW

La principal desventaja del radar CW simple es su falta de sensibilidad debido al ruido producido por los diodos detectores. Este ruido es originado por el efecto “Flicker” el cual es dependiente de la frecuencia. A bajas frecuencias el ruido es mayor y es donde se presenta la frecuencia Doppler.

Para tener una máxima eficiencia en un radar CW y superar los efectos del ruido “Flicker”, se utilizan receptores con una Frecuencia Intermedia (FI) suficientemente alta.

En la figura 2.4 se muestra un arreglo típico de este sistema y utilizando dos antenas una para la transmisión y la otra para la recepción.

En este arreglo se utilizan antenas separadas con el propósito de aumentar el aislamiento entre el transmisor y receptor. La frecuencia intermedia típicamente mas usada es de 30Mhz.

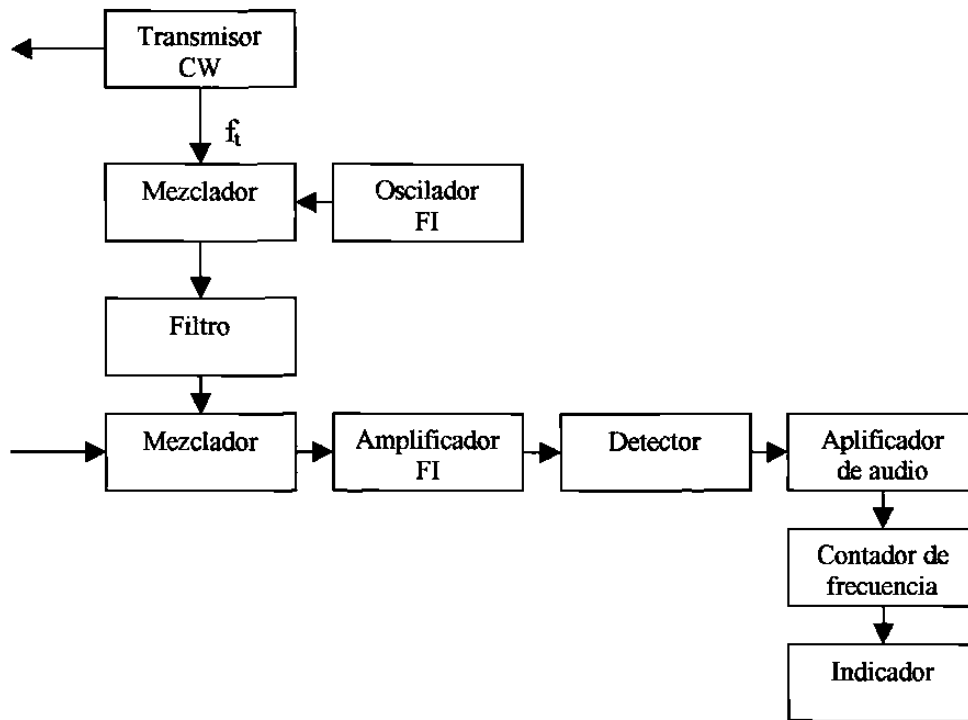


Fig.2.4 Radar CW con amplificación de FI

2.7.1 EL SIGNO DE LA VELOCIDAD RADIAL.

En algunas aplicaciones del radar CW es de interés saber si el blanco se está alejando o se está aproximando. Esto se puede determinar con filtros separados localizados a ambos lados de la frecuencia. Si la frecuencia de la señal del eco es más grande que la frecuencia de la señal portadora, el blanco se está aproximando y si la señal de la frecuencia del eco está por debajo de la frecuencia de la señal portadora el blanco se está alejando. En la figura 2.5 se muestra esto

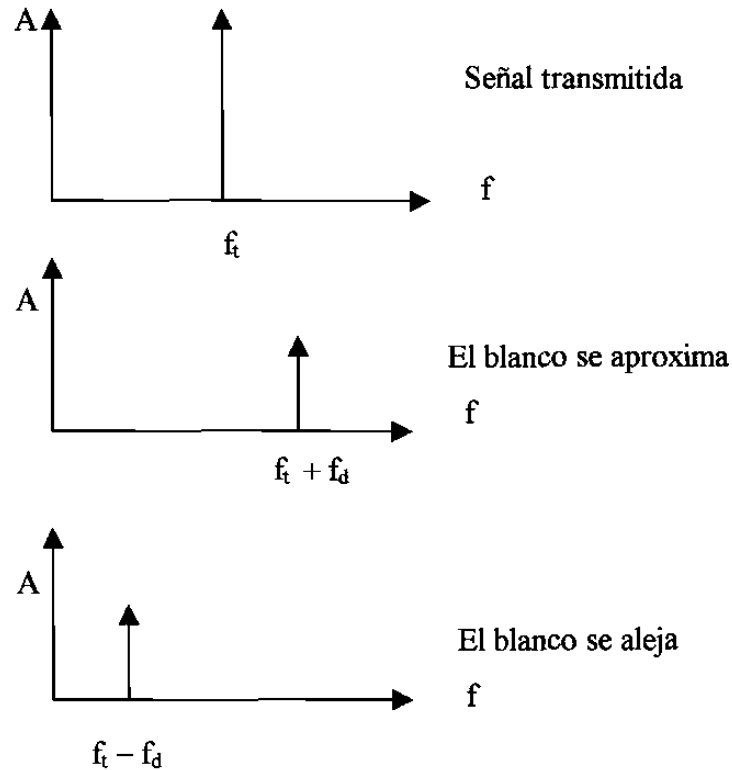


Fig. 2.5 Signo de la velocidad radial

2.8 RADAR DE FRECUENCIA MODULADA

La más grande limitación del radar Doppler, es la incapacidad para medir distancias, esto puede ser superado si la portadora transmitida está en frecuencia modulada. Si esto se hace, debe ser posible eliminar la principal dificultad con lo que al radar CW respecta, es decir, este es incapaz de distinguir un ciclo de otro. Al usar FM requerirá un incremento en el ancho de banda del sistema y así repetidamente verá que un incremento en el ancho de banda en un sistema es requerida si más información está para ser transmitida. (En este caso, información con respecto al alcance).

La fig. 2.6 muestra el diagrama a bloques de una aplicación común del radar CW FM, el altímetro aerotransportado. La modulación en frecuencia tipo sierra es usada por sencilla, aunque en teoría cualquier forma de onda puede ser adecuada. Si el objetivo (En este caso la tierra) es estacionario con respecto al plano una diferencia en frecuencia proporcional a la altura del avión existirá entre las señales recibidas y transmitidas. Esto es debido al hecho que la señal que se está recibiendo fue enviada en un momento cuando la frecuencia instantánea fue diferente. Si la velocidad de cambio de frecuencia con respecto al tiempo debido al proceso de FM se conoce, la diferencia de tiempo entre las señales enviadas y recibidas pueden ser rápidamente calculadas, como saber la altura del avión. Así la salida del mezclador en la figura 2.6, que produce el diferencial de frecuencia, puede ser amplificado, alimentado a un contador de frecuencia y entonces a un indicador cuya salida es calibrada en metros o pies.

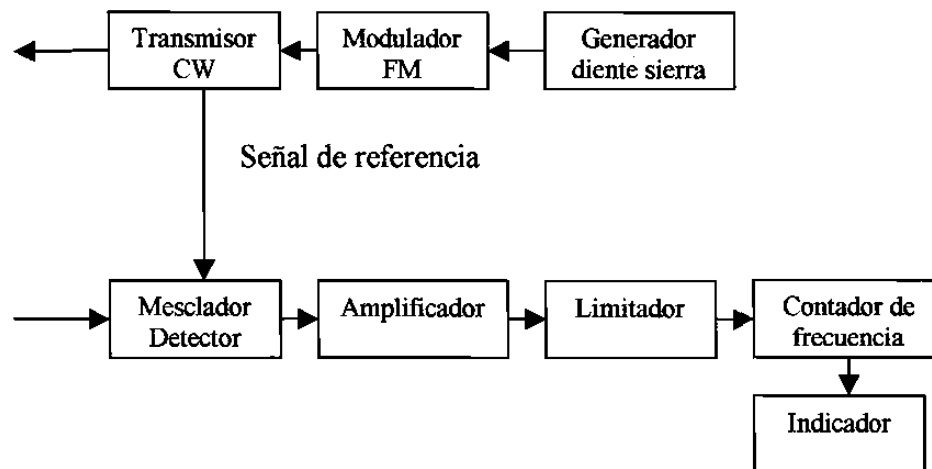


Fig. 2.6 Radar de frecuencia modulada

Si la velocidad relativa del radar y del objetivo no es cero, otra diferencia de frecuencia ó pulso querrá sobreponerse por si misma en la cima del diferencial de frecuencia aquí discutido a causa del cambio de frecuencia Doppler. Sin embargo, el diferencial de la frecuencia promedio será constante y debido a la diferencia de tiempo

entre el envío y regreso de un ciclo particular de la señal. Así la correcta medición de altura puede ser aún hecha en base al promedio del diferencial de frecuencia. El pulso sobrepuesto en esta diferencia ahora puede ser usado así como radar Doppler ordinario para medir la velocidad (en este caso) del avión, cuando se ha permitido tolerancia para el rango de inclinación.

El altímetro es la mejor aplicación de un radar CW FM. Este es usado en lugar de los radares de pulso a causa de los rangos cortos involucrados, desde entonces el radar CW no tiene límites en el alcance mínimo mientras que los radares de pulso tienen límites debido a el ancho del pulso.

Además, el equipo de baja potencia puede ser usado como radar Doppler CW. Dependiendo el tamaño y proximidad de la tierra, las antenas pequeñas pueden también ser usadas, reduciendo el volumen del equipo aún más. Un altímetro típico opera en la banda C, usa un transmisor de potencia típicamente de 1 a 2 W fácilmente obtenido de un diodo IMPATT o un diodo Gunn y tiene un rango alrededor de los 10,000 pies o más con una precisión cercana al 5%.

CAPÍTULO 3

RADARES PARA CONTROL DE TRÁNSITO AÉREO

3.1 RADAR DE SUPERFICIE

Los aeropuertos, en las áreas terminales, son el punto convergente del tránsito aéreo originado desde gran número de aeropuertos y la capacidad de los controladores en estos aeropuertos terminales, aunada a las facilidades de aproximación de que se disponen, determina la cantidad de tráfico que se puede manejar sin excesivas demoras. En uno de estos aeropuertos, un importante factor que determina la rapidez del flujo de tránsito, es la pista. Si la pista de un aeropuerto permanece ocupada mucho tiempo, el grado de aceptación de aeronaves en la pista será muy baja. Si un controlador de aeropuerto puede acelerar el despegue de una aeronave de la pista, puede disminuir el intervalo entre llegadas sucesivas.

Los aeropuertos modernos son tan grandes y se localizan en áreas tan extensas que, muy a menudo, especialmente en condiciones de mala visibilidad, el controlador no puede determinar la posición exacta de las aeronaves dentro del área de maniobras. No podrá saber entonces, si ya han abandonado una pista o calle de rodaje o si esta rodando correctamente. Por estas circunstancias se ocasionan innecesarias demoras para aeronaves que van a aterrizar o a despegar, ya que el controlador no puede observar exactamente la posición de una aeronave. Necesariamente, por medidas de seguridad, tendrá que demorar cualquier operación que en realidad pudo haberse realizado con mayor premura sin disminuir mínimos de separación.

Otra dificultad que se presenta al controlador es que, en la noche, se le hace difícil observar los movimientos de las aeronaves o la posición de las aeronaves estacionadas que puedan constituir un peligro para las aeronaves que están rodando. Algunas veces no le es posible distinguir si se ha iniciado un despegue o si el extremo de aproximación de una pista está libre. Esta situación puede presentarse por visibilidad restringida u obstrucciones en el aeropuerto.

Se ha diseñado un equipo de radar para ayudar a el controlador a resolver estos problemas. Se le conoce como Equipo Detector de Superficie de Aeropuerto (ASDE) "Airport Surface Detection Equipment". Con este equipo se han reducido las demoras de las aeronaves que están operando en el aeropuerto cuando no están al alcance visual de la torre de control debido a las condiciones mencionadas anteriormente.

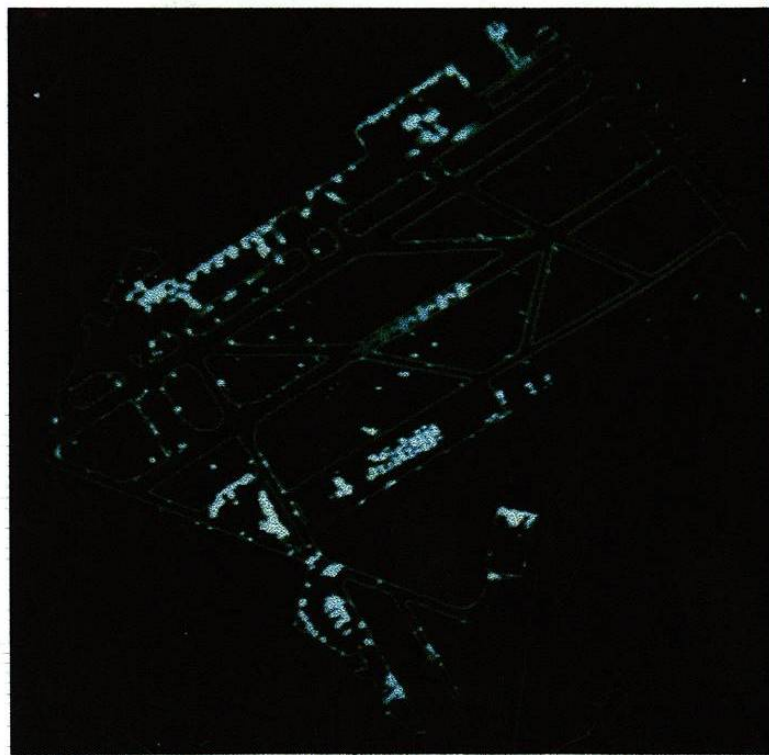


Fig. 3.1 Presentación de Radar de Superficie

El ASDE tiene un alcance de 6 Km. de radio en condiciones de cielo despejado y se reduce a 5Km. en condiciones de lluvias severas (16 mm/h). Este radar localiza objetivos en el suelo más bien que en el aire y opera en la banda J de la asignación

nueva de microondas. La antena normalmente gira a 60 r.p.m. dando como resultado una presentación de imagen similar a un mapa de relieve con una definición muy clara entre los objetivos. Para dar un ejemplo de la claridad de esta definición, dos objetos separados 1.5 mts. y a 1500 pies de la antena aparecerán como dos objetivos distintos.

Las pistas, calles de rodaje y caminos se ven negros en la pantalla y los objetivos se iluminan dando una imagen clara al controlador de todo el movimiento de las aeronaves y vehículos. Para mejorar la presentación se agregan mapas del contorno del aeropuerto indicando la posición de las pistas, calles de rodaje, edificios etc.

En la figura 3.1 se observa la presentación en una unidad de visualización, en la figura 3.2 se ve el domo sobre una torre de control y en la figura 3.3 se observa la instalación en una estructura especial para el sistema de radar.

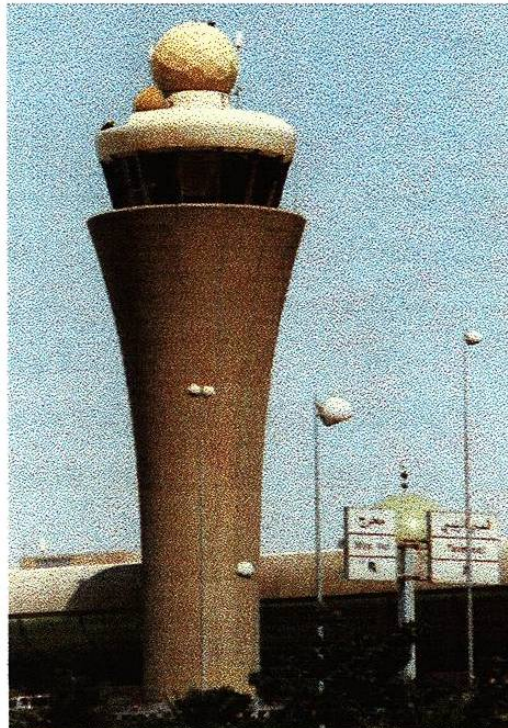


Figura 3.2 Radar de Superficie sobre Torre de Control



Figura 3.3 Torre para Radar de Superficie

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN SISTEMA

	Válvula de potencia	Magnetron
Frecuencia	15.7 a 16.7 GHz	
Potencia pico		30 KW
Ancho del pulso		40 ns
Repetición de frecuencia	7.0 a 10.0 KHz	
Rotación de antena		60 r.p.m.

3.2 RADAR DE PRECISIÓN DE APROXIMACIÓN

Este radar esta diseñado para usarse como una ayuda para aterrizaje por instrumentos. Todas las características de este equipo enfatizan la exactitud en distancia, dirección y elevación. Como las aproximaciones se inician dentro de un radio de 10

millas del aeropuerto, se sacrifica el alcance máximo del equipo para acrecentar la precisión de estas características. Por lo tanto el área vigilada por el radar de precisión es únicamente la de aproximación final a la pista y es así como se ha llegado a usar principalmente como una ayuda de aterrizaje.

Las aproximaciones se pueden hacer en condiciones de visibilidad y de tiempo muy malas y es lo suficientemente preciso como para que el piloto reciba información de la distancia y del ángulo de elevación, hasta el momento que aterrice.

El radar de precisión de aproximación PAR “ Precisión Approach Radar ” es empleado en bases militares y en aeropuertos que no tienen sistemas de aterrizaje por instrumentos ILS “ Instrument Landing System ”.

El principio fundamental del equipo de radar de precisión es igual al de cualquier otro radar, siendo la principal diferencia el método de presentación. El área por cubrir es la aproximación final a la pista, de manera que el alcance esta limitado a 10 millas, azimut a 20° y elevación a 7° . Para hacerlo más preciso la longitud de onda es de 3 cm. Se usan dos antenas en la instalación del radar, una que registra un plano vertical y otra que registra el horizontal.

La imagen presentada al controlador puede ser en pantallas que registre un alcance de 10 millas y ajustable hasta 3 millas. Este arreglo proporciona un alto grado de exactitud en la etapa más crítica de la aproximación.

Cada pantalla esta dividida en dos partes, la mitad superior presenta información de altitud y distancia y la mitad inferior presenta azimut y distancia. Los blancos se mueven en los indicadores de derecha a izquierda. El punto de origen del barrido está al lado izquierdo de la pantalla y el barrido va de arriba hacia abajo.

Una seria desventaja de este radar es que se ve afectado por la lluvia fuerte. En caso de que sobre el aeropuerto exista este tipo de precipitación, las gotas de agua serán reflejadas como ecos radar y saturaran la pantalla, obstruyendo la visión del blanco que se encuentra en la aproximación final.

En las mayorías de las facilidades de control de tránsito aéreo las pantallas de este radar están en el control de aproximación junto a las del radar de vigilancia.

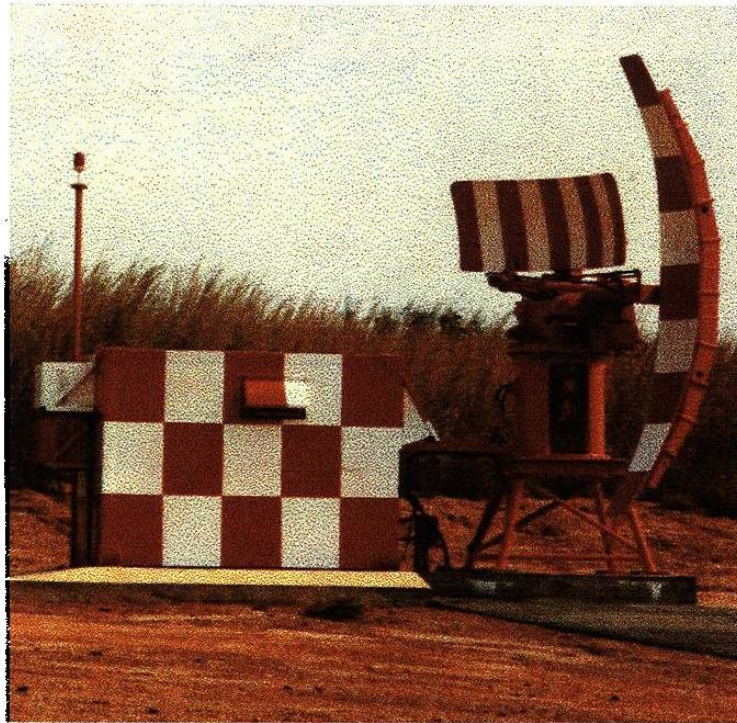


Figura 3.4 Radar de Precisión Fijo

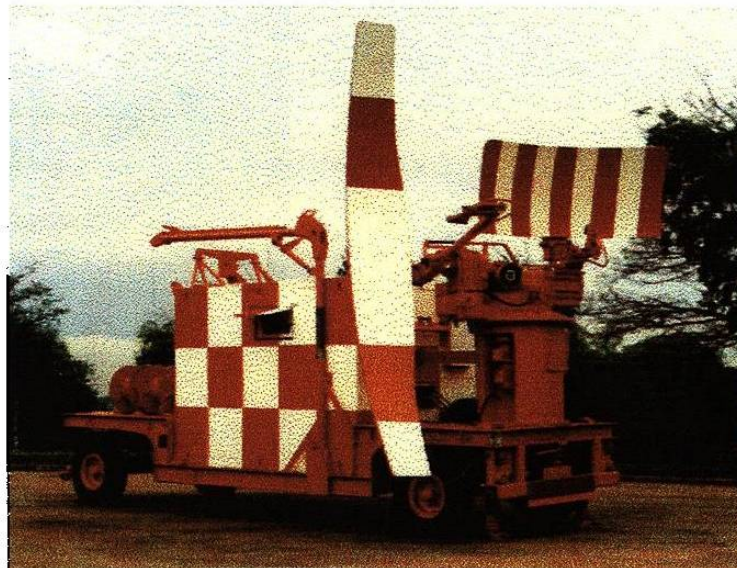


Fig.3.5 Radar de Precisión Móvil

La figura 3.4 muestra una configuración fija, en la figura 3.5 una configuración móvil y en la figura 3.6 se muestra el tipo de presentación.

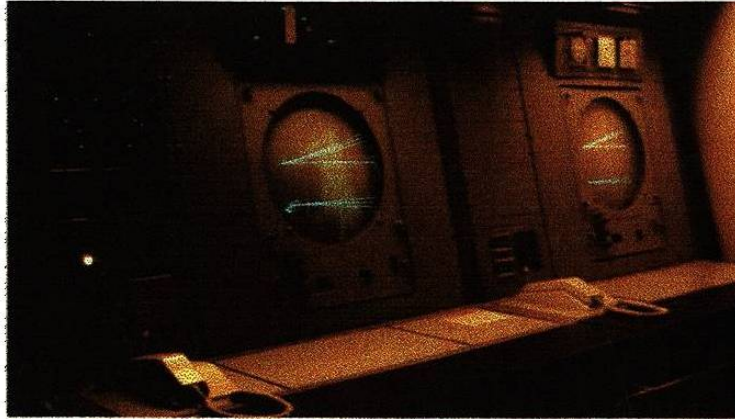


Fig.3.6 Presentación de Radar de Precisión

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN SISTEMA

Rango máximo	40 Km.
Rango de frecuencia	9.0 a 9.2 GHz
Tubo de potencia	TWT
Potencia pico	30 kW
Ancho del pulso	0.5 μ s.

3.3 RADARES DE APROXIMACIÓN

Estos radares conocidos como radares de vigilancia de aeropuerto (ASR) “AIRPORT SURVEILLANCE RADAR” presentan una información de imagen de

objetivo de 360° . Es un radar de mediano alcance para control de tránsito aéreo en las inmediaciones del aeropuerto.

Estos sistemas de radar están diseñados para alcances máximos de 80 millas y una altura de operación de 20,000 pies. Los parámetros que proporciona al controlador de tránsito es el rango y el azimut. Una ventaja de este sistema es que también presenta claramente las áreas de precipitación.

La presentación es en una pantalla en la cual tiene la antena situada en el centro de la misma, es decir, que todas las aeronaves dentro del alcance del radar tienen su posición definida en cuanto a rumbo y distancia referida al centro de la pantalla.

La antena tiene una rotación de 15 rpm. aproximadamente de modo que el controlador tiene un refresco de la información cada 4 seg. Lo que le permite mantener una representación, casi continua, de la información.

En la figura 3.7 se muestran dos antenas de un sistema de radar primario las cuales están asociadas con una antena de radar secundario (parte superior) y en la figura 3.8 se muestra una sala de equipos donde se observa la línea de transmisión que es guía de onda.

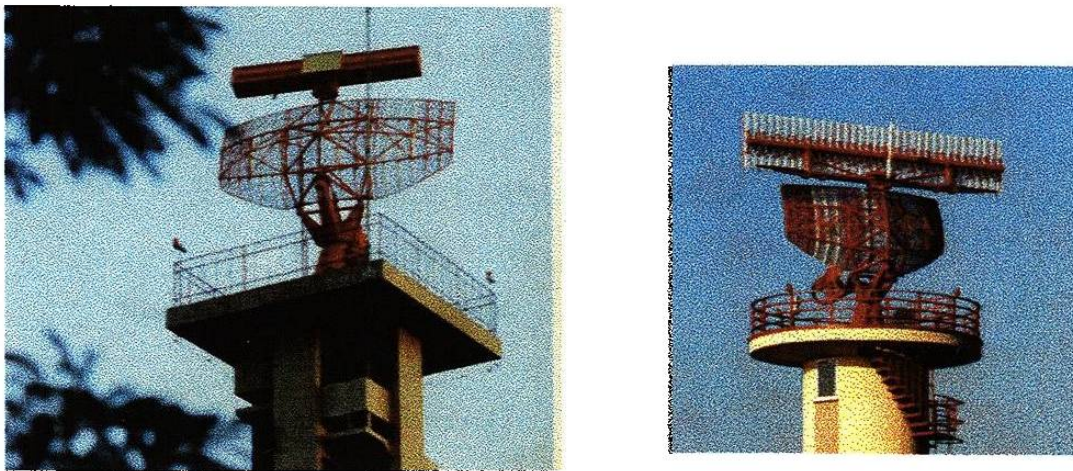


Fig.3.7 Antena de Radar de Aproximación

En las áreas terminal es muy común que los sistemas de radar estén asociados para dar al controlador una imagen de ambos sistemas, inclusive en algunas ocasiones se

les proporcionan canales meteorológicos para estar vigilando las condiciones meteorológicas de la cobertura a su cargo.

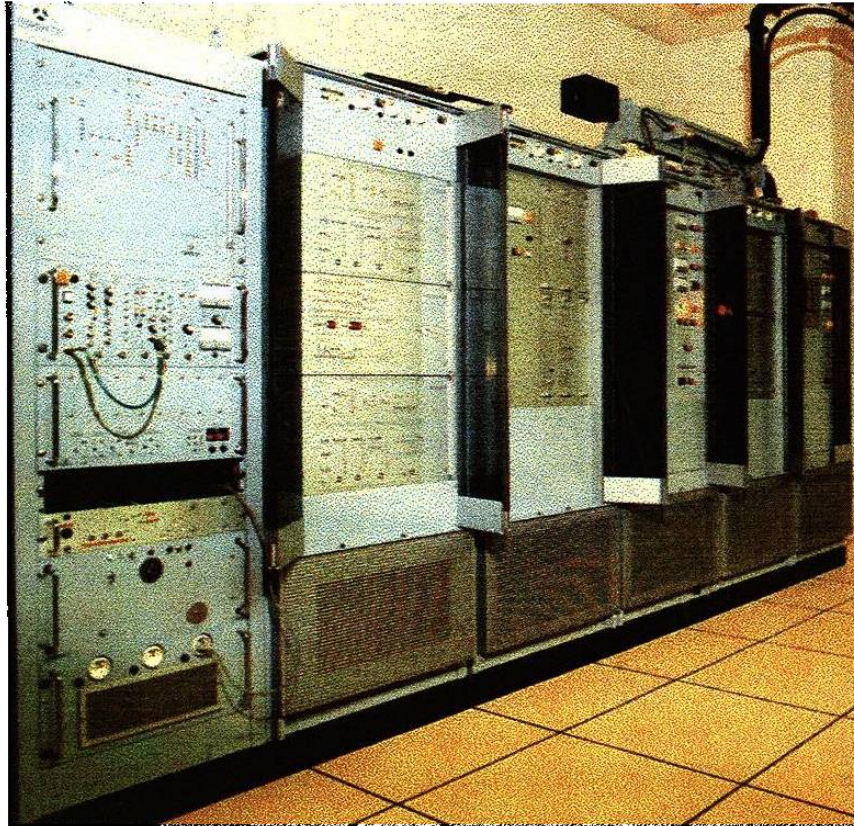


Fig.3.8 Sala de equipos

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN SISTEMA

Banda de frecuencia	S
Tubo de potencia	Magnetrón
Potencia pico	750kW
Ancho de pulso	1 μ s
Velocidad de rotación	15rpm
Frecuencia de repetición de pulsos	1000Hz
Rango	60 MN
Antena	2.3 \times 4.7m
Ganancia de antena	34 dB

Ancho de haz

1.5°

En las áreas terminal es muy común el uso de sistemas de radar secundarios asociados a los sistemas de radar primario. En el capítulo 4 se dará información detallada de estos sistemas.

3.4 RADAR DE RUTA PRIMARIO

Estos sistemas de radar se utilizan en el espacio aéreo superior es decir arriba de 20000 pies, normalmente se instalan en lugares estratégicos (partes altas, cerros) y con coberturas de 200 a 400MN.

En las figuras 3.9 y 3.10 se muestran las antenas de estos sistemas donde también están acompañadas con antenas de radar secundario



Fig. 3.9 Radar de ruta primario

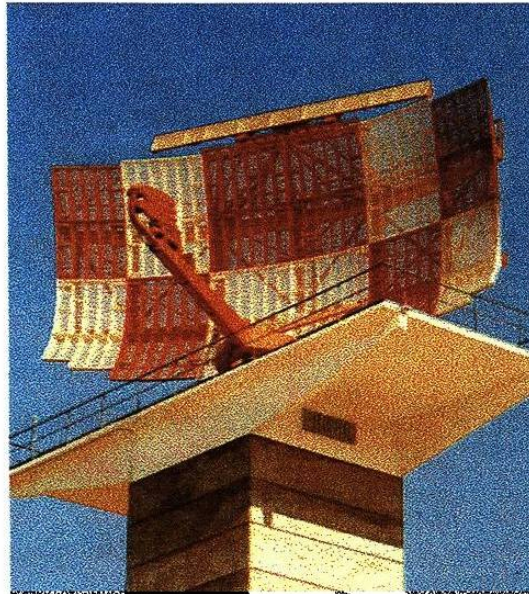


Fig. 3.10 Antena de radar de ruta

Estos sistemas de ruta primarios ya no se utilizan para la aviación civil ya que se utilizan solamente radares secundarios pero son muy útiles para la aviación militar o de vigilancia

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN SISTEMA

Banda de frecuencia	L
Tubo de potencia	Magnetrón
Potencia pico	2.2MW
Ancho el pulso	3.3 μ s
Velocidad de rotación	6 r.p.m.
Frecuencia de repetición de pulsos	340Hz
Rango	200 MN
Antena	7 \times 13 m
Ganancia de antena	35 dB
Ancho de haz	1.1°

CAPÍTULO 4

RADAR SECUNDARIO PARA CONTROL DE TRÁNSITO AÉREO

4.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN.

Los sistemas de radar secundario basan su principio de operación en el dialogo que existe entre un interrogador/receptor ubicado en tierra y un transponder a bordo de la aeronave.

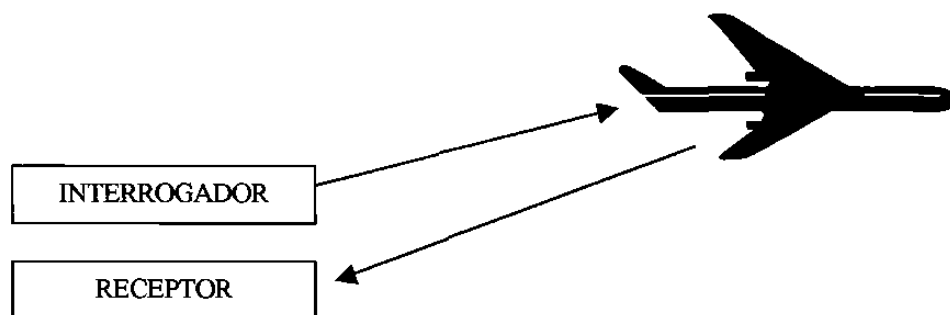


Fig.4.1 Principio de operación

En la figura 4.1 se muestra el principio de funcionamiento.

Los principales parámetros que proporciona el sistema de radar secundario son los siguientes:

RANGO
AZIMUT
IDENTIFICACIÓN
VELOCIDAD

ALTURA
PROCEDENCIA
DESTINO
TIPO DE AERONAVE

Los sistemas de radar secundario, usados en la actualidad, se desarrollaron a principios de la Segunda Guerra Mundial para satisfacer la necesidad de un equipo que permitiera la identificación de las naves enemigas. Este sistema comprendía el uso de un equipo de tierra encargado de transmitir una señal de interrogación al avión y un receptor transmisor a bordo de la nave para transmitir una respuesta a la estación de tierra. La interrogación de la estación en tierra se transmite direccionalmente y el avión responde con una señal omnidireccional.

La señal de interrogación en tierra normalmente es un par de pulsos de energía de radiofrecuencia a frecuencias de radar. Esta señal es recibida por el avión en donde se decodifica. Si el transponder del avión está ajustado para responder a esta interrogación, la salida del receptor hace que el transponder devuelva una señal codificada a la estación de tierra. Esta señal después de ser recibida y procesada por la estación de tierra pasa al indicador de radar para dar una indicación visual apropiada a la contestación. Si la respuesta del avión es satisfactoria, entonces se trata de un avión conocido.

Aunque el radar secundario es básicamente un equipo de radar, su operación presenta grandes diferencias de las de un radar básico de exploración. Con el uso del transponder para la generación de señales de retorno se eliminan las pérdidas por reflejo inherentes al sistema de radar primario. Esto permite que los transmisores en los extremos del enlace (interrogador y respondedor) operen con mucho menos potencia de salida que la requerida por el transmisor del radar primario. Con el uso de dos transmisores puede hacerse el envío de la señal de interrogación a una frecuencia y la recepción de la señal de respuesta a una frecuencia diferente, además de que con el uso

de dos frecuencias (una de la estación de tierra y otra del transponder) se elimina los ecos parásitos ocasionados por reflejos.

Otra diferencia principal entre el sistema de radar primario y secundario la tenemos en que el sistema de radar secundario no puede operar sin la colaboración del blanco, es decir, que para obtener señal de una nave, esta debe de estar equipada con transponder.

En las áreas terminal el sistema de radar secundario normalmente va enlazado al radar primario para obtener una visualización de ambos en un indicador común. Para esto es necesario sintonizar los dos sistemas en rango y azimut. Para la sincronización de rango normalmente se hace el uso de los disparos del radar directamente o una proporción del PRF (frecuencia de repetición de pulsos) del radar que se use. La sincronización azimutal puede obtenerse por iluminación de una antena común para los radares primario y secundario o montando una antena de radar secundario sobre la antena del radar primario (lo más usual).

Probablemente la ventaja más importante del radar secundario sobre el primario es que se puede proporcionar identificación rápida del avión equipada con transponder .

4.2 SISTEMAS DE RADAR SECUNDARIO

Los principales sistemas de radar secundario son los siguientes:

- a). IFF (Identification Friend or Foe)
- b). IFF/SIF (Identification Friend or Foe / Selective Identification Feature)
- c). SSR (Secondary Surveillance Radar)
- d). MSSR (Monopulse Secondary Surveillance Radar)

Los dos primeros con aplicaciones militares y los otros dos con aplicaciones civiles. Dentro de las aplicaciones civiles el más utilizado en la actualidad es el MSSR ya que da información más precisa de la posición del blanco.

4.3 TIPOS DE TRANSPONDER

Los diferentes tipos de transponder son los siguientes:

- El transponder T que corresponde al IFF.
- El transponder S que corresponde al IFF/SIF de 64 códigos.
- El transponder I que corresponde al SSR de 64 códigos.
- El transponder G que corresponde al SSR de 4096 códigos.

En la actualidad el utilizado prácticamente es el transponder G de 4096 códigos.

4.4 MODOS DE INTERROGACIÓN.

Los modos de interrogación dependen del período o intervalo que hay entre un par de pulsos llamados P1 y P3.

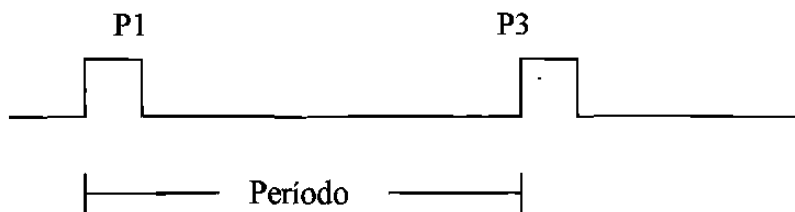


Fig. 4.2 Modo de interrogación

MODO DE INTERROGACIÓN	PERÍODO ENTRE P1 Y P3
1	3 μ s
2	5 μ s
3/A	8 μ s
B	17 μ s
C	21 μ s
D	25 μ s

Tabla 4.1 Modos de interrogación

Nota. Existe otro modo llamado **S** del cual se dará información en el anexo numero 1.

Los primeros tres son asignados para uso militar y los últimos cuatro para la aviación civil. El modo 3/A es común para ambos. Los modos A y B son utilizados para la identificación, el modo C para la altura y el modo D esta disponible.

Debido a que los patrones de radiación de las antenas tienen lóbulos secundarios. Se crea un problema en la zona cercana del radar, ya que el avión puede ser interrogado por los lóbulos secundarios de la antena. Al ocurrir esto, la etiqueta de la aeronave aparece en la pantalla formando círculos concéntricos. Para evitar esto se transmite otro pulso 2 μ s después de P1 llamado pulso de control (P2).

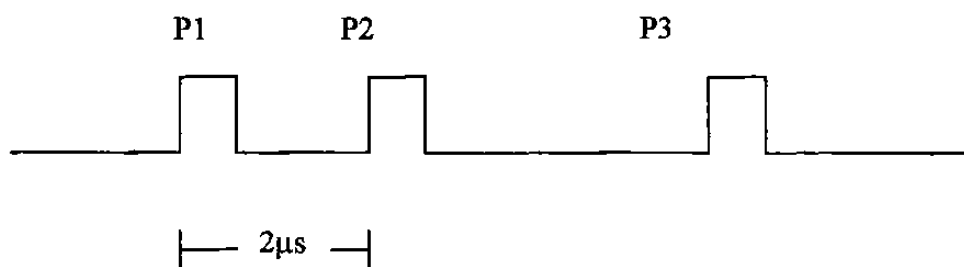


Fig. 4.3 Modo de interrogación con P2

Este pulso de control, permite al transponder saber si es interrogado por un lóbulo lateral o por el lóbulo principal. Cuando el transponder es interrogado por un lóbulo principal, el transponder contesta. Cuando lo es por un lóbulo lateral el transponder no contesta.

4.4.1 CARACTERÍSTICAS DE MODOS DE INTERROGACIÓN DEL SISTEMA DE RADAR SECUNDARIO (SSR).

Características técnicas de los sistemas SSR que tienen exclusivamente las funciones de Modo A y Modo C.

- Radiofrecuencia de interrogación y control $1030 \text{ MHz} \pm .2\text{MHz}$.
- Las frecuencias portadoras de la transmisión de control y de cada una de las transmisiones de interrogación no diferirían entre sí de mas de $.2\text{MHz}$.
- La polarización de las transmisiones de interrogación, control y respuesta será vertical
- el intervalo entre P1 y P3 para el modo 3/A será de $8 \pm 0.2\mu\text{s}$.
- El intervalo entre P1 y P3 para el modo C será de $21 \pm 0.2\mu\text{s}$.
- La duración de los pulsos P1, P2 y P3 serán de $.8 \pm 0.1\mu\text{s}$.
- Formas de onda, intervalos y puntos de referencia para sensibilidad y potencia se dan en el anexo numero 2
- El tiempo de aumento de los pulsos P1, P2 y P3 estarán comprendidos entre 0.05 y $0.1 \mu\text{s}$.
- El tiempo de disminución de los pulsos P1, P2 y P3 estarán comprendidos entre 0.05 y $0.2 \mu\text{s}$.
- La amplitud radiada de P2 en la antena del transponder será:
 - Igual o mayor que la amplitud radiada de P1 a partir de las transmisiones de los lóbulos laterales de la antena que radia P1, y P3
 - A un nivel inferior a 9dB por debajo de la amplitud radiada de P1, dentro del arco de interrogación deseado.

4.5 CODIFICACIÓN DE LA RESPUESTA.

El transponder en el avión decodifica el modo de interrogación por el espacio entre los pulsos de interrogación y su respuesta es un tren de pulsos con una duración de cada pulso de $0.45\mu\text{s}$ como se muestra en la siguiente figura.

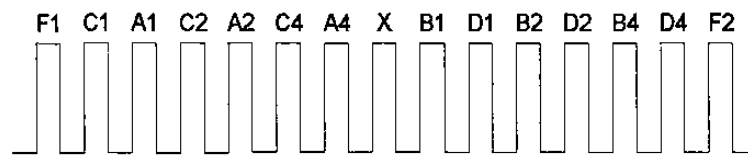


Fig.4.4 Respuesta del transponder

Este tren de pulsos esta compuesto de lo siguiente:

- Los pulsos F1 y F2 conocidos como pulsos paréntesis y están separados $20.3\mu\text{s}$.
- Los pulsos A1, A2, A4, B1, B2 ,B4, C1, C2, C4, D1, D2 y D4 los cuales contienen la información de identificación o de altura dependiendo del modo de interrogación
- Existe un espacio X el cual esta disponible para ampliar el numero de códigos de 4096 a 8192

4.5.1 CARACTERÍSTICAS DE LA TRANSMISIÓN DE RESPUESTA DEL TRANSPONDER

- La frecuencia portadora de la transmisión de la respuesta será de 1090MHz
- La tolerancia de la frecuencia será de $\pm 3\text{MHz}$
- La polarización será vertical
- En la respuesta se empleara una señal compuesta con un espacio de $20.3\mu\text{s}$

- Los pulsos de información estarán espaciados a intervalos de $1.45\mu\text{s}$ a partir del primer pulso de trama (F1). La designación y posición de estos pulsos de información será la siguiente.

Pulsos	Posición μs
C1	1.45
A1	2.90
C2	4.35
A2	5.80
C4	7.25
A4	8.70
X	10.15
B1	11.60
D1	13.05
B2	14.50
D2	15.95
B4	17.40
D4	18.85

- Además de los pulsos de información se transmitirá un pulso especial de identificación de posición (SPI) “Special Position Indication” pero solamente mediante selección manual (del piloto). Siempre que se transmita, se hará con un intervalo de $4.35\mu\text{s}$ después del último pulso de trama (F2) de las respuestas de modo A solamente.
- Todos los pulsos de respuesta tendrá una anchura de $0.45 \pm 0.1 \mu\text{s}$
- El tiempo de aumento de los pulsos estará comprendido entre 0.05 y $0.1 \mu\text{s}$.
- El tiempo de disminución de los pulsos estarán comprendidos entre 0.05 y $0.2\mu\text{s}$

- La variación de amplitud de un pulso con respecto a cualquier otro en un tren de respuesta no excederá de 1dB
- La tolerancia en el espaciado de cada pulso será de $\pm 0.10 \mu s$
- la designación de los códigos consistirá en números entre 0 y 7 usados de la siguiente forma ABCD

4.6 ORGANIZACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE RADAR SECUNADARIO PARA CONTROL DE TRÁNSITO AÉREO

En la figura 4.5 se muestra una configuración de una estación de radar secundario para control de tránsito aéreo, como se puede observar el equipo se encuentra duplicado por razones de seguridad. Cuando el equipo se encuentra operando normalmente y ocurre una falla el equipo emergente entra automáticamente.

4.6.1 ANTENA

La función de ésta es la de radiar la energía electromagnética de los distintos patrones de radiación utilizados en el sistema de radar secundario

Estas antenas normalmente son de diseño especial para que los patrones de radiación cumplan con los requerimientos del sistema de radar.

En la transmisión se requieren dos patrones de radiación conocidos como patrón suma (Σ) y patrón diferencia (Δ). Por el patrón suma se transmiten los pulsos de radiofrecuencia P1 y P3 y por el patrón diferencia se transmite el pulso P2.

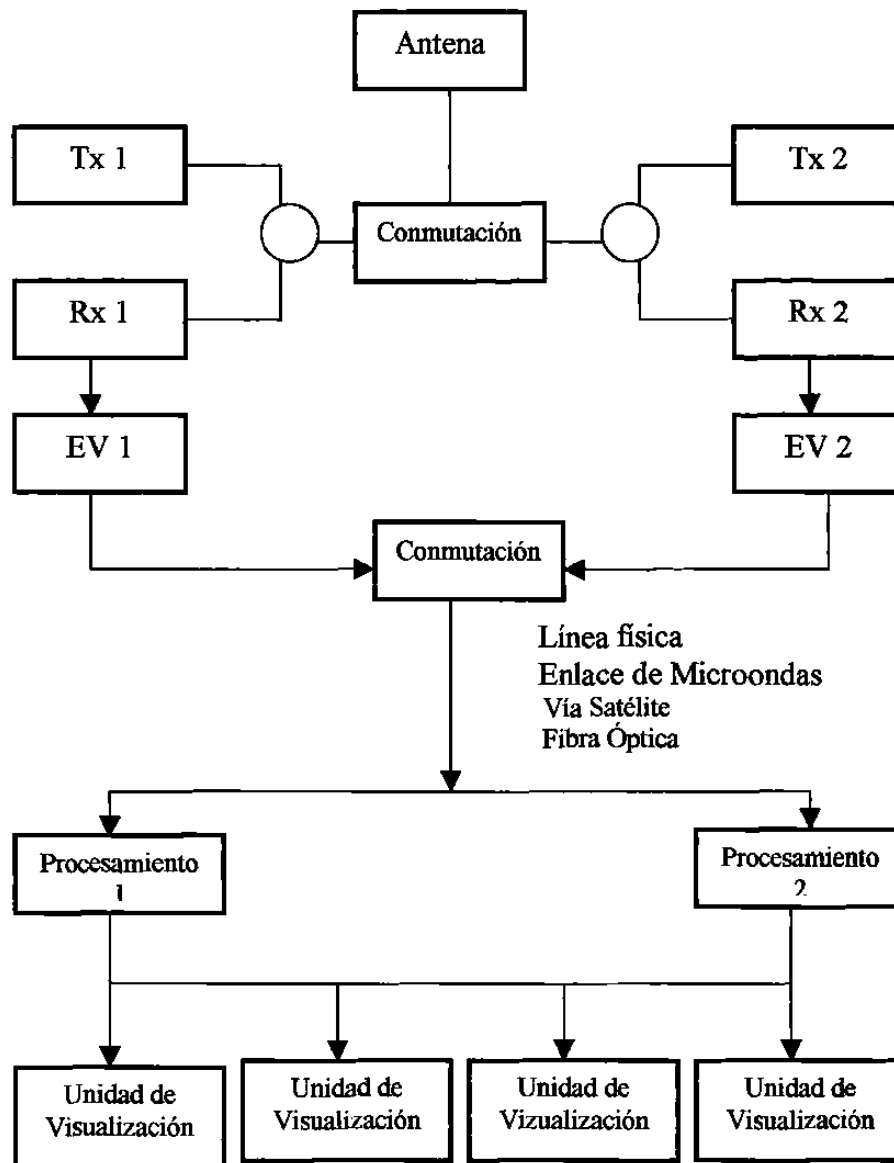


Fig. 4.5 Organización de una estación de radar secundario

En la recepción dependiendo del tipo de radar se pueden utilizar uno o dos patrones de radiación, en el SSR se utiliza un solo patrón y en el MSSR se utilizan dos patrones de radiación.

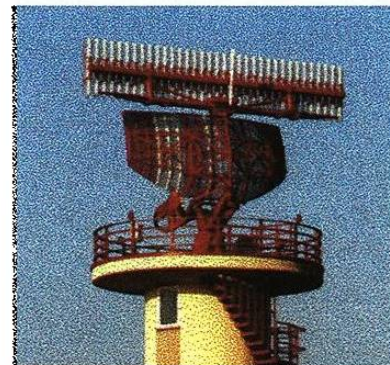


Figura 4.6 Antenas del radar secundario

En la figura 4.6 se muestran dos antenas de MSSR, del lado izquierdo se muestra una antena de un sistema de radar secundario solamente y del lado derecho se muestra una antena montada sobre una antena de radar primario. Estas antenas están formadas por 35 elementos radiantes y cada elemento radiante tiene 11 dipolos .

4.6.2 TRANSMISOR

La función del transmisor es la de generar los pulsos de radiofrecuencia P1, P2 y P3 con las características requeridas por el sistema. En la figura 4.7 se muestran las componentes principales de un transmisor

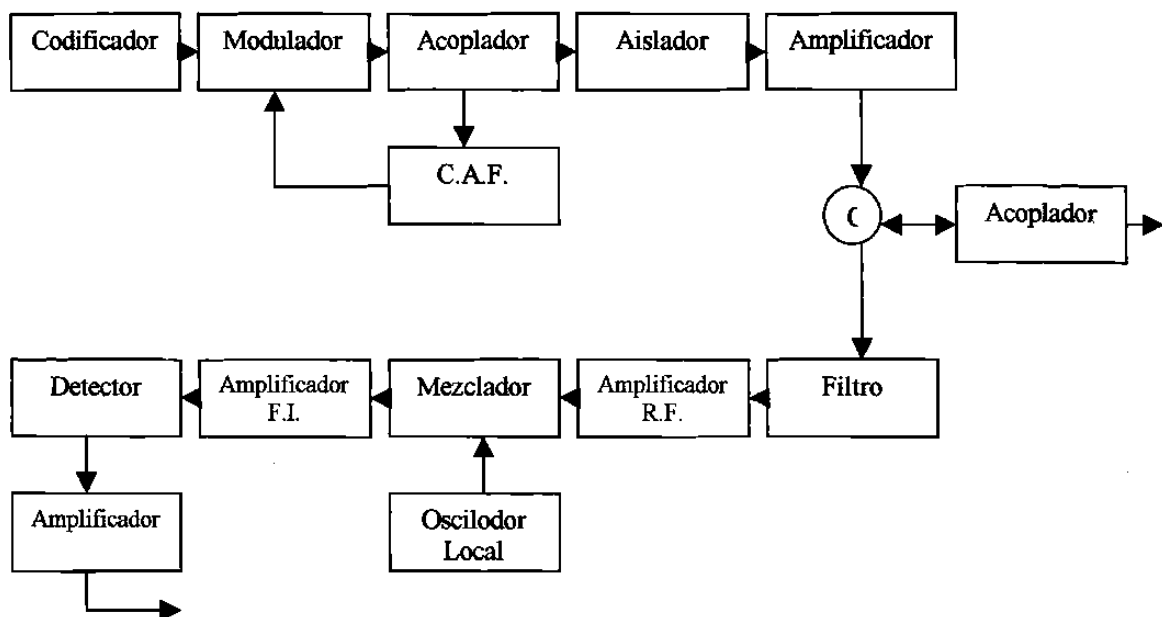


Fig.4.7 Transmisor Receptor de un radar secundario

4.6.3 RECEPTOR

La función del receptor es la de recuperar la respuesta del transponder, normalmente son del tipo superheterodino. En la figura 4.7 se muestra un receptor en el cual se utiliza una frecuencia intermedia de 60 MHz ya que la frecuencia del oscilador local es de 1030MHz .

4.6.4 EXTRACTOR DE VIDEO

La información proporcionada por el receptor puede ser visualizada directamente en las unidades de visualización sin embargo tal visualización no corresponde a las necesidades de control de tránsito aéreo ya que es necesario presentar la información clara y completa.

El papel del extractor de video es efectuar en tiempo real el análisis de la información radar y para ello se diseñan equipos especiales o se utilizan computadoras de propósito general con programas especiales para analizar la información radar.

Funciones principales que realiza el extractor de video

- Checa el período entre F1 y F2.
- Checa el ancho de los pulsos
- La presencia o ausencia de los pulsos A1, A2, A4, B1, B2, B4, C1, C2, C4, D1, D2 y D4.
- Revisa que el espacio X no este presente.
- Checa si esta presente el pulso S.P.I. (Special Position Indication).
- Calcula el rango.
- Calcula el azimut.
- Revisa si hay códigos de emergencia.
- Realiza conversión de coordenadas.
- Adapta el mensaje al tipo de línea de transmisión.

4.6.5 PROCESAMIENTO

El equipo de procesamiento esta compuesto generalmente por computadoras de propósito general o propósito específico. Cuando las computadoras son de propósito

general, son programadas para realizar funciones específicas exclusivas para procesar la información del radar.

Funciones principales que realiza el equipo de procesamiento.

- Checa el código
- Realizar cambio de código
- Calcular velocidad
- Calcular altura
- Generar vector de posición
- Agregar videomapas
- Agregar planes de vuelo
- Proporcionar alarmas de conflicto

Los equipos de procesamiento actualmente tienen capacidad para procesar distintos sistemas de radar de acuerdo a las necesidades que se tengan, por ejemplo hay sistemas de 4, 8, 12 y 16 líneas de radar.

4.6.6 UNIDAD DE VISUALIZACIÓN

La última parte del procesamiento es presentar la información adecuadamente para su explotación, estas unidades pueden ser del tipo de PPI (indicador panorámico de posición) o tipo monitor de alta resolución (2048 × 2048).

CAPÍTULO 5

RADAR PRIMARIO PARA CONTROL DE TRÁNSITO AÉREO

5.1 INTRODUCCIÓN

En las primeras etapas de desarrollo, se encontró que el radar de pulsos tenía mucho más ventajas sobre los otros tipos, consecuentemente, la mayor parte del esfuerzo se dedicó a la investigación en el campo de radar de pulsos. Los sistemas de Onda continua y de Frecuencia modulada dan buenos resultados en su área de aplicación, pero están limitados en comparación con el de pulsos, que dan más información debido a que el blanco puede ser móvil o estacionario, grande o pequeño, por eso es que para navegación aérea prácticamente es el único tipo que se usa. En un sistema de pulsos, un transmisor envía pulsos de radiofrecuencia. En el tiempo que el transmisor no radia se puede recibir fácilmente cualesquier eco que regrese de un blanco.

Los parámetros que proporciona el sistema de radar de pulsos son el Rango y el Azimut. El rango es la distancia que hay de la cabeza del radar (posición de la antena) y el blanco. El azimut es un ángulo que hay entre el norte magnético y la posición del blanco.

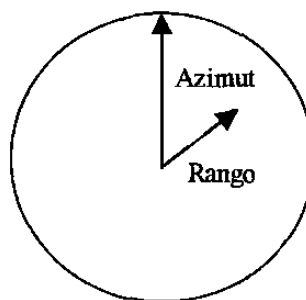


Fig. 5.1 Parámetros de radar primario

El tiempo que transcurre entre un pulso transmitido y el eco que regresa, determina el rango o distancia con bastante precisión hacia el blanco ya sea que este sea móvil o fijo. Puesto que el transmisor no emite ninguna señal mientras que el receptor esta en “escucha” de un eco, una sola antena puede servir tanto para el transmisor como para el receptor. Utilizando una antena altamente direccional el azimut del blanco se puede obtener directamente de la posición de la antena.

5.2 SISTEMA BÁSICO DE RADAR DE PULSOS

En la figura 5.2 se da un diagrama a bloques de un sistema típico de radar.

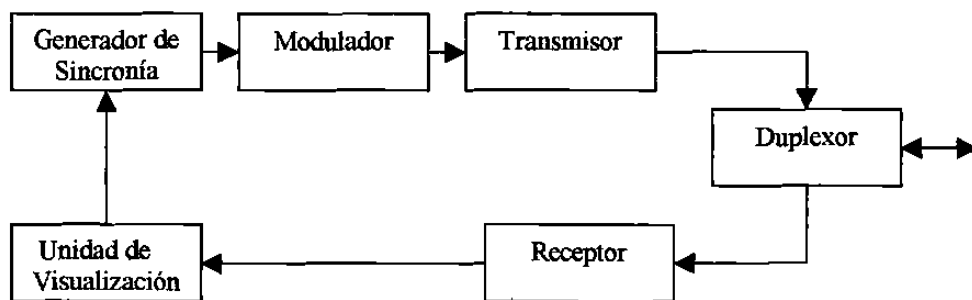


Fig. 5.2 Sistema típico de radar

Cada una de estas unidades pueden ser técnicamente diferentes de un sistema a otro, pero el propósito será el mismo.

5.2.1 UNIDAD DE SINCRONÍA.

La unidad de sincronía o unidad de tiempo de un sistema de radar indica y controla la secuencia de operación que forma un ciclo completo. EL sistema puede ser autosincronizado, lo cual significa que el pulso transmitido inicia la secuencia de tiempo, o puede ser sincronizado por una unidad separada. En la actualidad en la mayoría de los casos el tiempo se establece por una unidad externa. Esta unidad proporciona pulsos a un intervalo de tiempo controlado por precisión. Este intervalo representa un ciclo completo que comienza con el principio de un pulso transmitido en

el tiempo cero y termina con el principio del próximo pulso transmitido, como se muestra en la figura 5.3.

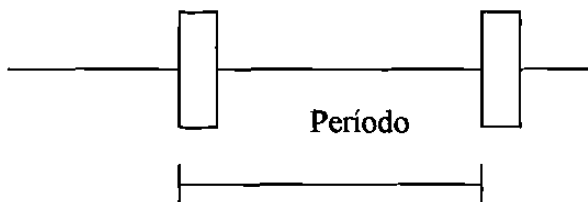


Fig. 5.3 Ciclo completo

A este período se la conoce como intervalo de repetición de pulsos (PRI) (Pulse Repetition Interval) el cual es el inverso de la frecuencia de repetición de pulsos (PRF) (Pulse Repetition Frequency).

$$\text{PRI} = 1 / \text{PRF}$$

Por ejemplo si se tiene un sistema de radar de pulsos con un PRF de 700 pulsos por segundo el PRI será de 1.42 ms.

5.2.2 MODULADOR.

El modulador tiene la función de generar un pulso de una amplitud y duración de tiempo correctas y entregar este pulso a la velocidad de repetición de pulsos del sistema de radar. Dependiendo del tipo de dispositivo que se use en el transmisor van a ser las características del modulador, es importante señalar que los bordes de subida y bajada del pulso deben de ser suficientemente verticales.

5.2.3 TRANSMISOR.

La función del transmisor es generar la energía de radiofrecuencia que se aplicara a la antena para ser radiada al espacio. Como en estos tipos de radar se requiere mucha potencia normalmente se utilizan válvulas de potencia. Las válvulas mas utilizadas son

los magnetrones, los klystron de multicavidades y los tubos de onda progresivas (TWT) (Traveling Wave Tube). En la actualidad en algunas aplicaciones se utilizan dispositivos de estado sólido diseñados especialmente para este propósito.

5.2.4 RECEPTOR

El mejoramiento en el diseño de los receptores ha aumentado la utilidad del radar mas que quizás cualquier otro adelanto técnico. Del blanco solo regresa una pequeña fracción de la energía transmitida. Esta pequeña señal que puede ser menor que un microvolt es captada y amplificada por el receptor y la convierte en señal útil. El rango útil del sistema de radar es directamente proporcional a la capacidad del receptor para manejar estas pequeñas señales. Cuando más pequeñas sean las señales que pueda manejar, mayor será la sensibilidad del sistema.

El receptor superheterodino es el mas utilizado en los sistemas de radar, las frecuencias intermedias más utilizadas son 30 MHz, 60 MHz y 70 MHz. El amplificador de radiofrecuencia utilizado en la primera etapa se diseña para que sea de bajo ruido, por lo general son amplificadores parametricos o amplificadores de bajo ruido (LNA) "Low Noise Amplifier". En la figura 5.4 se da un diagrama típico de un receptor de radar.

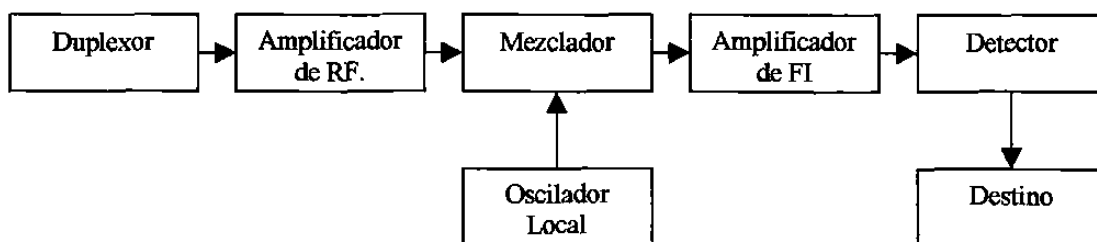


Fig.5.4 Receptor de radar típico

5.2.5 DUPLEXOR.

El duplexor es un dispositivo que hace posible la transmisión y la recepción a través de la misma guía de onda y la misma antena. La acción de esta unidad es aislar al

receptor mientras el transmisor esta en operación y de aislar al transmisor mientras se reciben pulsos de ecos.

5.2.6 ANTENA

La antena de radar sirve para la misma función básica que lleva a cabo cualquier antena transmisora-receptora. Por necesidad se diseña con alta ganancia. En los radares de vigilancia, las antenas giran los 360° de azimut, mientras que los radares de precisión usados para aterrizaje por instrumentos solamente necesitan girar 10° o 20° a cada lado de la pista. La velocidad de rotación puede variar, pero en general para radares de búsqueda de largo alcance, la velocidad es regularmente de 5 a 10 revoluciones por minuto. Para alcances mas cortos la velocidad puede ser de 12 a 15 r.p.m., como en el caso del equipo del radar terminal utilizado en los aeropuertos. En algunas aplicaciones se utilizan antenas de arreglos de fase donde no es necesario mover la antena para mover el haz y simular el movimiento de la antena.

Para que el sistema de radar se dé cuenta de la posición de la antena y pueda calcular el azimut del blanco, en la antena se colocan unos dispositivos conocidos como decodificadores de antena, los cuales proporcionan dos señales muy importantes conocidas como señal norte e incrementos azimutales.

5.3 CONFIGURACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE RADAR PRIMARIO

En la figura 5.5 se da una configuración típica de una estación de radar primario para control de tránsito aéreo. La estación opera en diversidad de frecuencia. Es decir, un transmisor opera a una frecuencia y el otro opera a otra frecuencia diferente. Por ejemplo en un sistema de radar terminal utilizado en los aeropuertos que trabajan en la banda S la frecuencia del transmisor número uno podría ser de 2880 MHz y la del transmisor número dos de 3020MHz. Las ventajas que se tienen al trabajar en diversidad de frecuencia son que se mejora la recepción y se eliminan las velocidades ciegas.

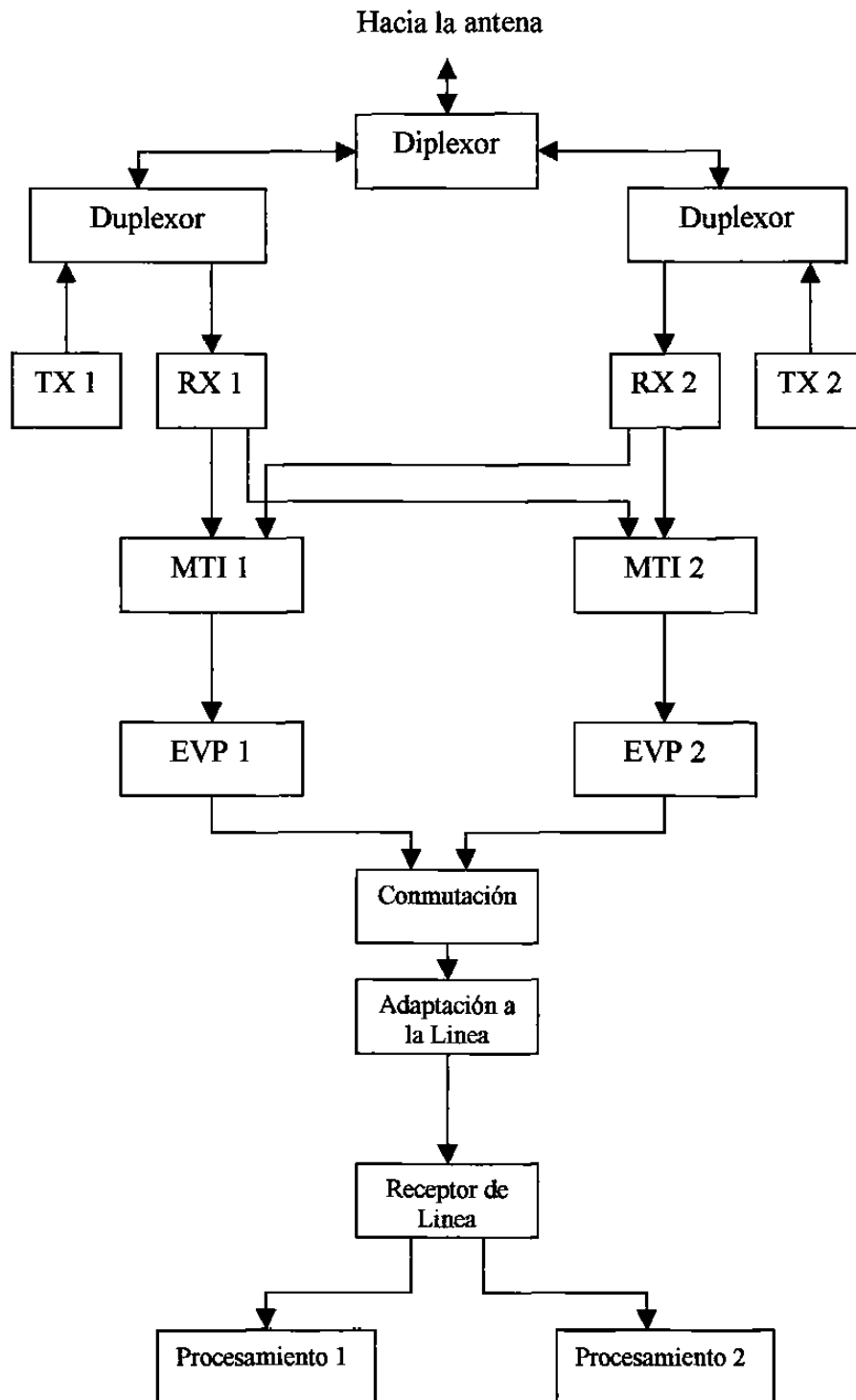


Fig. 5.5 Configuración de una estación de radar primario

Cuando el sistema esta operando en diversidad de frecuencia los transmisores operan en tiempos diferentes y los sistemas están protegidos para que nunca se disparen al mismo tiempo los transmisores. En la figura 5.6 se muestra que hay un tiempo de retraso entre un transmisor y el otro transmisor.

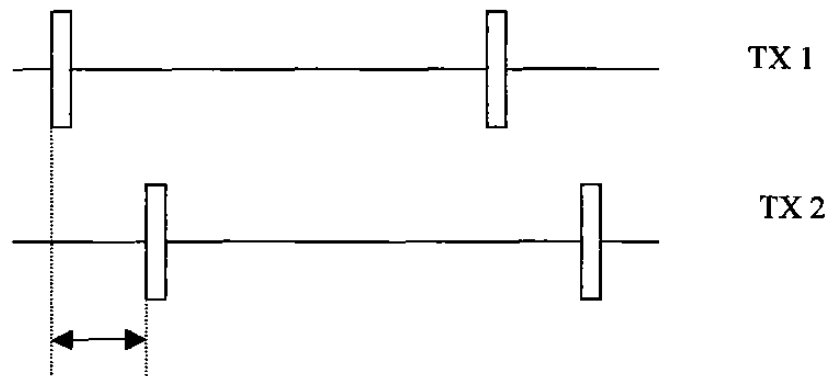


Fig. 5.6 Tiempo de retardo entre transmisores

El diplexor es un filtro de radiofrecuencia que permite. En la transmisión, guiar las dos frecuencias diferentes hacia la antena y en la recepción, cada una de ellas a su respectivo receptor. Del conjunto formado por el transmisor, receptor y duplexor ya se dijo anteriormente sus funciones.

El MTI “Moving Target Indicator” o Eliminador de ecos fijos. El objetivo de este equipo, son la de eliminar en las zonas próximas a la estación, los ecos fijos tales como edificios y montañas, dando como resultado una visualización mas adecuada para la explotación del video radar en las unidades de visualización.

Su principio de funcionamiento se basa en el efecto Doppler, Básicamente el eliminador de ecos fijos compara los ecos de una recurrencia a otra, si no hay cambio de fase se trata de un eco fijo y la elimina, si hay cambio de fase la procesa y la manda a la unidad de visualización.

CAPÍTULO 6

SISTEMAS DE COMUNICACIÓN PARA CONTROL DE TRÁNSITO AÉREO

6.1 GENERALIDADES

Las comunicaciones juegan el papel más importante en el control de tránsito aéreo y son de dos tipos:

- Comunicaciones aire tierra
- Comunicaciones punto a punto (tierra a tierra)

Las comunicaciones aire tierra es la radioayuda más importante y es la que permite una comunicación directa entre el piloto y el controlador de tránsito aéreo. En cualquier operación aérea el piloto debe de seguir las instrucciones del controlador de tránsito aéreo para que las operaciones se lleven de una forma ordenada y con seguridad. Las frecuencias asignadas para este propósito están en la banda de 118 MHz a 136MHz. Dependiendo del área de control es la frecuencia asignada.

6.2 COMUNICACIONES AIRE TIERRA.

El servicio internacional de telecomunicaciones aeronáuticas se encuentra dividida en cuatro partes.

1. Servicio Móvil Aeronáutico. Servicio de radiocomunicación entre estaciones de aeronaves y estaciones terrestres, o entre las primeras

2. Servicio fijo aeronáutico. Servicio de telecomunicaciones entre puntos fijos determinados, que se suministran primordialmente para seguridad de la navegación aérea y para que sea regular, eficiente y económica la operación del servicio aéreo.
3. Servicios de radionavegación aeronáuticos. Servicios de radio-determinación que se da a las aeronaves solamente para determinar su posición o dirección o para dar avisos sobre obstáculos a la navegación.
4. Servicios de radiodifusión aeronáutica. Servicio de radio-difusión dedicado a la transmisión de información relativa a la navegación aérea.

En los servicios móvil aeronáuticos se tienden a uniformar los servicios de comunicaciones destinados a proporcionar a una aeronave en vuelo elementos necesarios para garantizar la seguridad, eficiencia y regularidad de las operaciones.

El servicio móvil aeronáutico comprende las comunicaciones realizadas entre estaciones terrestres y las estaciones de las aeronaves. Consecuentemente las comunicaciones efectuadas entre las aeronaves y las torres de control de aeródromo; entre las aeronaves y los controles de aproximación, de área, o radares; entre las aeronaves con los centros de información de vuelos o bien con las estaciones aeronáuticas de ruta, deben de sujetarse a los principios básicos de comunicaciones asentados en los procedimientos que rigen el servicio móvil aeronáutico.

En frecuencias otorgadas al servicio móvil aeronáutico únicamente se cruzará tráfico correspondiente a los mensajes aprobados por este servicio. Ninguna comunicación ajena a los mismos podrá ser encaminada a través de tales frecuencias

Todas las estaciones terrestres que sirvan a aeropuertos internacionales y a rutas usadas por los servicios aéreos internacionales, deberán usar el idioma Inglés en sus comunicaciones con las aeronaves cuando éstas no puedan usar el idioma de la estación terrestre utilizada normalmente.

El servicio internacional de telecomunicaciones aeronáuticas usara la hora media de Greenwich la medianoche se designara como 2400 y las 0000 para su principio.

6.3 FRECUENCIAS ASIGNADAS

La banda de 118 a 132 MHz fue asignada en 1947 por la conferencia de radiocomunicaciones por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones). En conferencias posteriores se amplió de 117.975 a 137 MHz.

En la tabla 6.1 se muestran estas asignaciones.

Frecuencia en MHz	Utilización mundial
118-121.4 inclusive	Servicios móviles aeronáuticos nacionales e internacionales
121.5	Frecuencia de emergencia
121.6-121.975 inclusive	Comunicación de superficie de los aeródromos internacional y nacional
122-123.05 inclusive	Servicios móviles aeronáuticos nacionales
123.1	Frecuencia auxiliar
123.15-123.675	Servicios móvil aeronáutico nacional
123.7-129.675 inclusive	Servicio móvil aeronáutico internacional y nacional
129.7-130.875 inclusive	Servicio móvil aeronáutico nacional
130.9-136.975	Servicios móviles aeronáuticos internacionales y nacionales

Tabla 6.1 Bandas de frecuencias asignadas a comunicaciones

La separación mínima entre frecuencias asignadas al servicio móvil aeronáutico será de 25 KHz. La frecuencia mas baja asignable será de 118MHz y la mas alta de 136.975MHz.

6.4 COMUNICACIONES PUNTO A PUNTO

Las comunicaciones punto a punto también conocidas como comunicaciones tierra/tierra, juega también un papel importante en las operaciones de centros de tránsito aéreo. Con estas comunicaciones se logra coordinar las operaciones entre servicios de

torre y centros de control, centros de control de aproximación y centros de control de ruta, entre centros de control y centros de control tanto nacional como internacionalmente

Para las comunicaciones punto a punto se utiliza los servicios proporcionados por compañías telefónicas o por instalaciones propias de la empresa que proporciona los servicios de control de tránsito aéreo.

En la actualidad existe gran cantidad de empresas dedicadas a la fabricación de equipos para integrar en un mismo sistema las comunicaciones punto a punto y comunicaciones aire tierra.

La labor de los sistemas de comunicación de voz es la de sustentar la comunicación aire/tierra y tierra/tierra.

Los sistemas actuales están basados totalmente en tecnologías digitales y reúnen las demandas de la actual tendencia en la dirección de tráfico aéreo para las normas más altas de la seguridad del sistema y la confiabilidad

Todas estas normas son una respuesta a una arquitectura específica la cual emplea técnicas modernas comprobadas para la conmutación de voz digital, control de microprocesadores de los recursos de comunicación interna y externos y la ingeniería de programación.

Los equipos están basados en una arquitectura altamente modular, distribuida y descentralizada, la cual incorpora una redundancia muy amplia. El sistema a través de una estructura modular flexible, facilita la configuración de sistemas, desde un rango de usuario pequeño hasta la capacidad máxima de grandes centros de control aéreo.

CAPÍTULO 7

RADIOAYUDAS PARA EL CONTROL DE TRÁNSITO AÉREO

7.1 RADIOFARO OMNIDIRECCIONAL (V.O. R.)

7.1.1 INTRODUCCIÓN

El VOR, “VHF OMNIDIRECTIONAL RANGE” (RADIOFARO OMNIDIRECCIONAL EN VHF) es una estación de radio que produce, teóricamente, un número infinito de haces o trayectorias (radiales) dentro de los 360 grados de su emisión. Podemos imaginarnos gráficamente este radiofaro como un pequeño núcleo del que emanan incontables radios que se prolongan en línea recta hacia todas direcciones. Aunque su emisión puede hacer posible la detección de innumerables haces, o trayectorias, en la práctica y bajo condiciones óptimas de operación, solo se utilizan 360 radiales, uno por cada grado azimutal.

Considerado como radioayuda de corto alcance, el VOR debiera instalarse y mantenerse en operación a lo largo de las rutas aéreas y en los lugares donde la intensidad del tráfico y el ejercicio eficaz del control de tránsito aéreo requiera de tal facilidad para la operación segura y eficiente de las aeronaves.

7.1.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN.

La operación del VOR esta basado en la comparación de la diferencia de fase eléctrica existente entre dos señales de audiofrecuencia radiadas simultáneamente. Esta diferencia de fase varia con el azimut y tiene, en el lugar de la observación, un valor igual al correspondiente al ángulo azimutal que, con respecto al norte magnético, existe en tal lugar medido desde la ubicación del VOR grado por grado y en sentido de giro de las manecillas del reloj.

Las señales transmitidas por una estación de VOR terrestre dan información de azimut (designada como distancia angular medida en grados en dirección de las manecillas del reloj desde el norte magnético). La información de azimut es interpretada por el receptor del VOR de un avión y puede ser mostrada directamente en grados en el indicador del mismo. Esto se realiza por medio de la medición de diferencia de fases entre las dos componentes de la señal VOR, ver figura 7.1

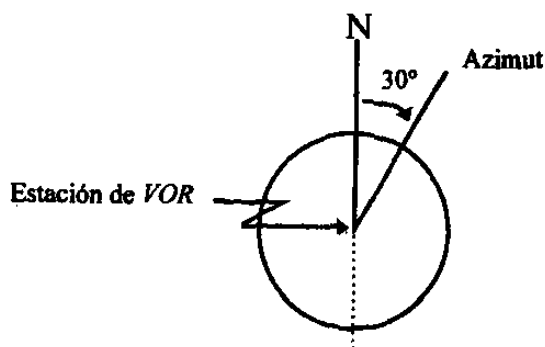


Fig. 7.1 Determinación del azimut.

La energía de radiofrecuencia transmitida por la estación de tierra esta polarizada horizontalmente y contiene dos componentes de navegación de 30 Hz.

Señal de referencia. Una componente es la señal de referencia de 30 Hz, teniendo una fase constante y alrededor de la estación VOR. La señal de referencia detectada en cualquier punto en un círculo alrededor de la estación terrestre, estará en fase con la misma señal detectada en cualquier otro punto.

Señal variable. El otro componente es la señal variable de 30 Hz, teniendo el cambio de fase de un grado por cada grado del cambio en azimut alrededor de la estación terrestre. La fase de la señal variable detectada en cualquier radial alrededor de la estación, es diferente de la fase de la misma señal detectada en cualquier otro radial.

7.1.2.1 DIFERENCIA DE FASE.

La información de azimut del VOR es dada por la diferencia de fase entre las señales de referencia y variable. Por definición, el curso del VOR en grados a cualquier punto alrededor de la estación, es igual al número de grados que la señal variable se atrasa con respecto a la señal de referencia en ese punto

A causa de que el norte magnético es el punto de referencia, éste tiene un azimut de cero grados, la estación de VOR es alineada así, las señales de referencia y variable están en fase a lo largo de este radial desde la estación de VOR hacia el norte magnético. Debido a que hay cero grados de diferencia de fase, el indicador del avión volando a lo largo de este radial indicara cero grados.

Si el avión se mueve 45° a la derecha alrededor de la estación (ver figura número 7.2), estará en un punto donde la señal variable se atrasa con respecto a la señal de referencia por 45° . El indicador del avión dará ahora un azimut de 45° . En el radial 90° la señal variable se atrasa con respecto a la señal de referencia por 90° y el indicador del avión dará un rumbo de 90° .

En todos los puntos alrededor de la estación, la fase de la señal de referencia permanece igual mientras que la señal variable tiene una fase diferente. La cantidad en grados que la señal variable se atrasa con respecto a la de referencia, es directamente igual a la lectura azimutal en grados de ese punto.

A lo largo del radial 270° la variable se atrasa con respecto a la referencia 270° , aunque también es verdad que en este punto la referencia esta adelantada a la variable en 90° , por lo tanto, al hablar de estos términos se usara únicamente el atraso de una

señal con respecto a la otra, para tener la relación directa entre la diferencia de fase y el azimut

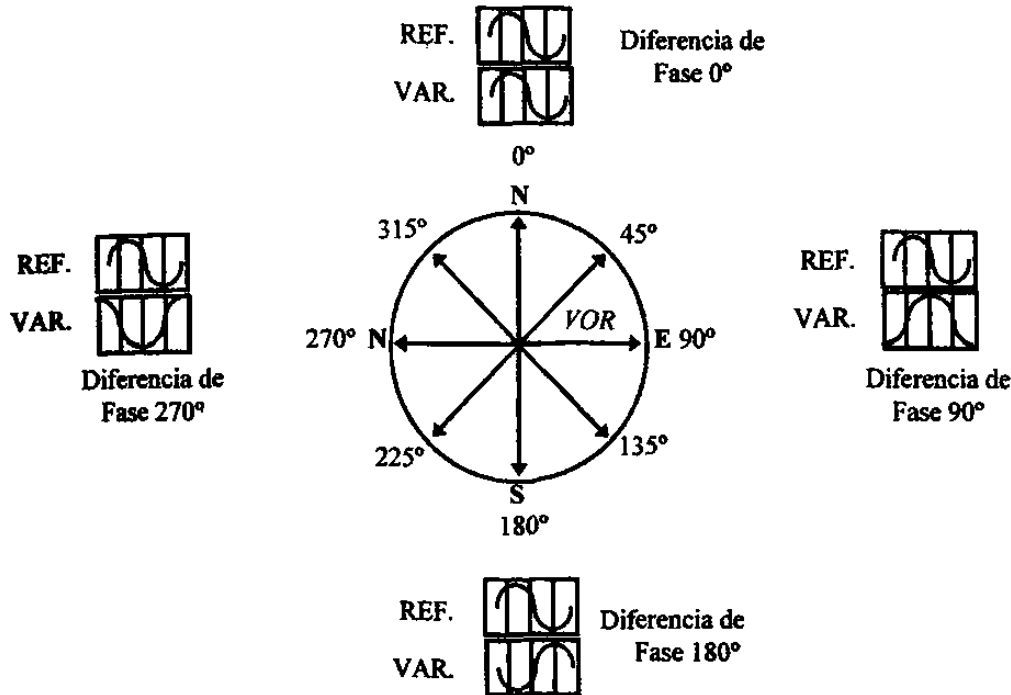


Fig. 7.2 Información de azimut

7.1.3 FRECUENCIAS DE OPERACIÓN

El VOR trabajará en las siguientes bandas de frecuencia:

a).- 112 a 118 MHz. La frecuencia mas alta asignable será de 117.95 MHz. El espacio entre canales sucesivos se hará a incrementos de 50 KHz (Ejemplos: 112.05, 112.1, 112.15, 112.2, 112.25, etc.)

b).- 108 a 112 MHz. El VOR solo usará de esta banda las frecuencias que terminen en “décimas par” o bien en “vigésimas impares” de MHz. (Ejemplos: 108.2, 110.6, 111.0, 111.25, 109.85, 110.05, etc.).

La utilización de esta banda por parte del VOR esta condicionada a que se use para cobertura limitada únicamente, a que no se ocasionen interferencias perjudiciales al ILS (Instrument Landing System) y siempre y cuando este sistema no necesite de dichas frecuencias.

7.1.4 SEÑALES COMPONENTES DEL VOR

La señal de R.F., transmitida por la estación terrestre contiene:

- La componente de navegación variable a 30 Hz, llamada señal de fase variable
- La componente de navegación de referencia a 30 Hz llamada señal de fase de referencia. Esta es llevada por una señal de 9960 Hz (comúnmente llamada subportadora de referencia o subportadora de 10 kHz), la cual esta modulada en frecuencia por 30Hz.
- La componente de 1020 Hz “llaveada”, llamada señal de identificación.
- La componente modulación de voz, llamada comúnmente señal de voz (esta señal es opcional).

Tres señales separadas de R.F. , de la misma frecuencia son alimentadas a las antenas simultáneamente. La señal de R.F. mayor (la portadora de referencia) es modulada en amplitud en el transmisor por las señales de identificación, voz y subportadora de 9960 Hz.

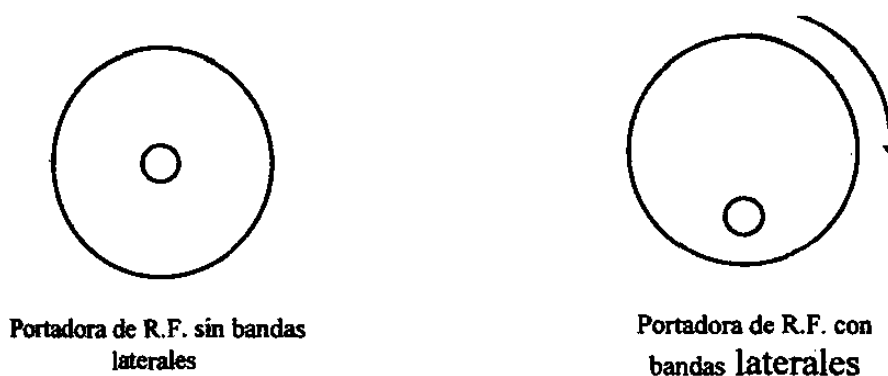
Las otras señales de R.F. (la variable de bandas laterales), son de mucho más baja potencia y están sumadas a la portadora de referencia en la antena. La variable de bandas laterales modula en amplitud a la portadora de referencia con una señal de navegación variable de 30 Hz.

7.1.4.1 SUBPORTADORA DE REFERENCIA

La componente de navegación de referencia es producida modulando en frecuencia la subportadora de 9960 Hz. , con una relación de 30 Hz. Dando por resultado una desviación de frecuencia de ± 480 Hz, o sea una variación entre 9480 Hz, y 10440 Hz. La resultante modula en amplitud a la portadora de referencia.

7.1.4.2 EL LIMACÓN

El patrón de radiación R.F. producido por la portadora de referencia, sin las bandas laterales sumadas en la antena es omnidireccional (un patrón circular alrededor de la estación). Cuando las bandas laterales son sumadas, el patrón es desplazado y girado alrededor de la antena a 30 Hz. Este patrón de radiación es llamado limacón, que aparecerá como un disco excéntrico girando en el espacio alrededor de la antena



transmisora del VOR (como se observa en la figura 7.3).

Fig. 7.3 Movimiento del limacón

NOTA. Aunque el limacón tiene una figura geométrica única, será representada aquí como un círculo. El limacón indicara el área de señal de R.F. fuerte. A cualquier punto dentro del alcance de la estación VOR, una señal de R.F. utilizable estará siempre presente.

La rotación del limacón (Fig. 7.4) debido a las bandas laterales produce lo siguiente:

1. Una onda senoidal de 30 Hz, que modula en amplitud a la señal de R.F. (que es la señal de navegación variable)
2. El cambio de fase de la señal variable.

Un receptor colocado a lo largo del radial norte observara como gira el limacón, los cambios de amplitud de la señal de R.F. serán una onda senoidal con una relación de 30 Hz, donde el limacón esta apuntando hacia el norte, la señal de R.F. será mas fuerte a lo largo de este radial. Como el limacón gira en sentido de las manecillas del reloj, la intensidad de la señal va decreciendo hasta que el limacón esta apuntando hacia el sur.

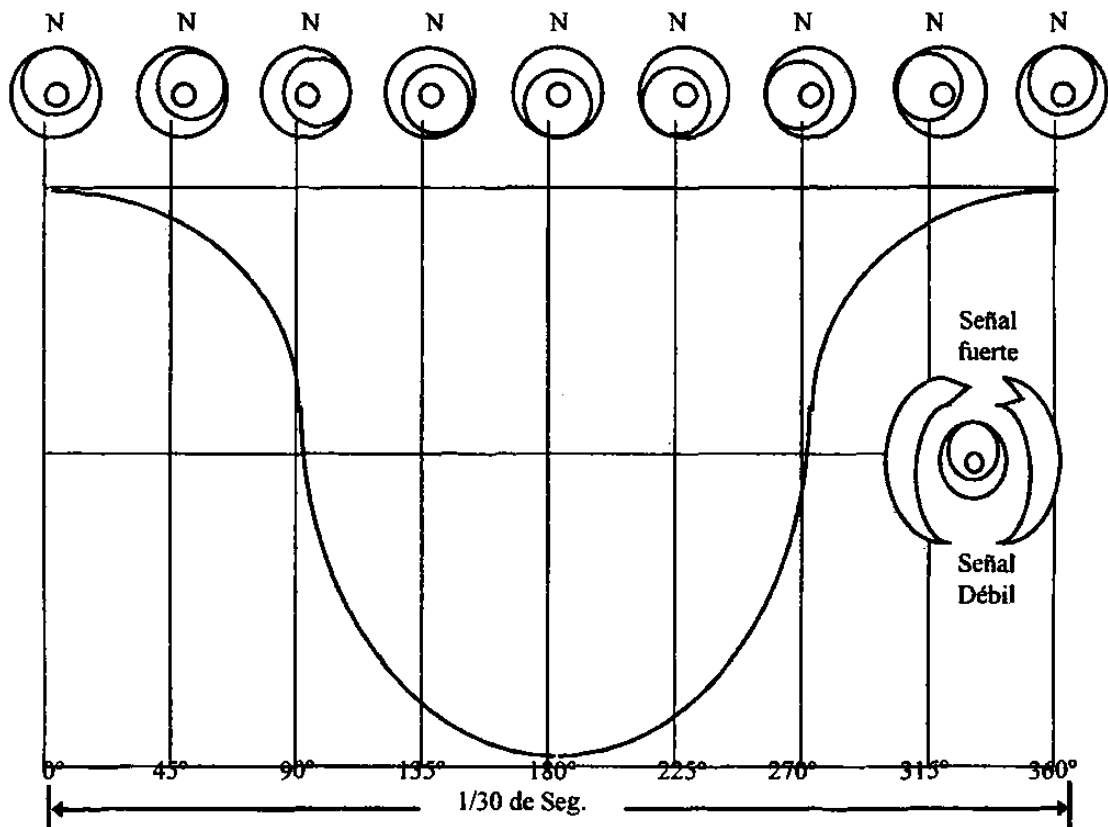


Fig. 7.4 El giro del Limacón origina la modulación

Como la rotación continúa, la señal de R.F. en el radial norte comienza a incrementarse nuevamente. La variación resultante en la potencia de R.F. es la señal variable de 30 Hz, (la portadora de referencia modulada en amplitud a 30 Hz).

En cualquier punto de un círculo alrededor de la estación se observará la misma modulación de amplitud de la señal de 30 Hz. Sin embargo, como el limacón tiene una rotación en sentido de las manecillas del reloj, el pico de la señal de R.F. (y por consiguiente el pico de la onda senoidal de 30 Hz) estará en puntos diferentes alrededor del círculo en diferentes tiempos. Por ejemplo, el pico positivo de la onda senoidal en el radial 45° ocurrirá después de haber pasado por el radial cero grados, (este retardo será de 45°). Como la señal completa de 30 Hz, es retardada, su fase también será retardada en 45° .

7.1.4.3 RELACIONES DE FASE

El pico de la señal de referencia de 30 Hz, ocurre cuando la subportadora de referencia esta en su frecuencia más alta. Esto ocurre en todos los puntos alrededor de la estación al mismo tiempo. El pico de la señal variable de 30 Hz, ocurre en cualquier punto alrededor de la estación cuando el giro del limacón alcanza este punto.

La estación es alineada de tal manera que el limacón apunte al norte cuando la señal de referencia de 30 Hz, tenga el pico (frecuencia mas alta). Por lo tanto, las señales de referencia y variable estarán en fase al norte o sea en el radial cero grados.

Debido a que el limacón es girado, el pico de la señal variable de 30 Hz, será visto en cualquier otro punto, pero después de haber ocurrido el pico de la señal de fase de referencia de 30 Hz, en el radial cero grados (la señal variable se atrasa con respecto a la de referencia). La cantidad de atraso (o de retardo de fase) en grados será igual al azimut en grados de ese punto. Por ejemplo, en el punto cuando el limacón alcanza el radial 45° y origina el pico de la señal variable de 30 Hz, en este punto, la señal de referencia tiene ya recorrido $45/360$ de ciclo. Por tanto la variable esta atrasada 45° con respecto a la referencia como se muestra en la figura 7.5.

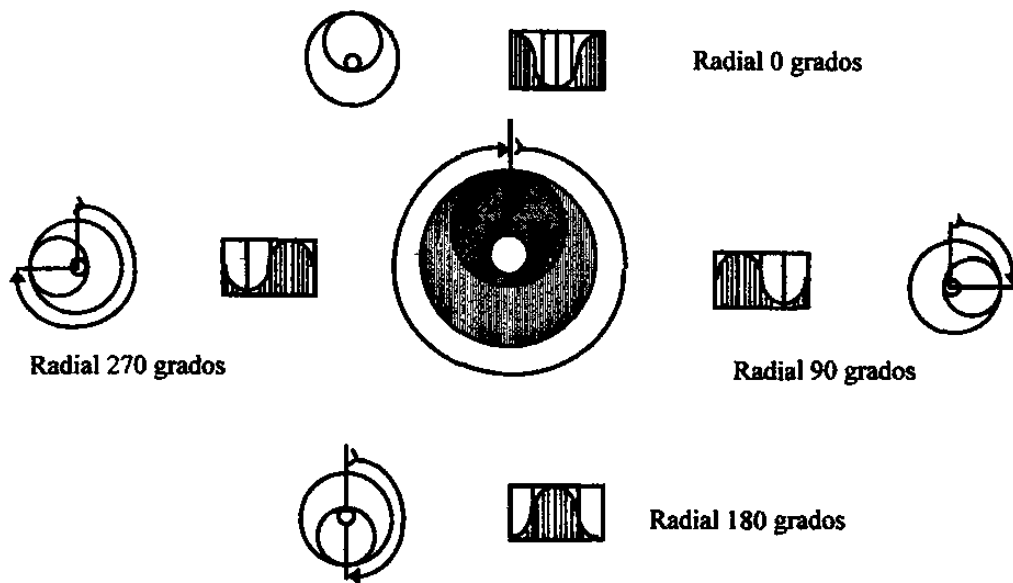


Fig. 7.5 Señal variable de 30 Hz esta atrasada en fase

7.1.5 OPERACIÓN DE LA ANTENA DE RANURA.

La antena del VOR es un cilindro metálico de cuatro ranuras, que es alimentada simultáneamente por tres señales de radiofrecuencia separadas, que son: La portadora de referencia y las dos variables de bandas laterales.

Solamente la señal resultante de R.F. (el limacón giratorio) es emitida desde la antena. Sin embargo, para su fácil descripción se va a referir a varios componentes como si se estuvieran emitiendo separadamente desde la antena y se combinaran en el espacio.

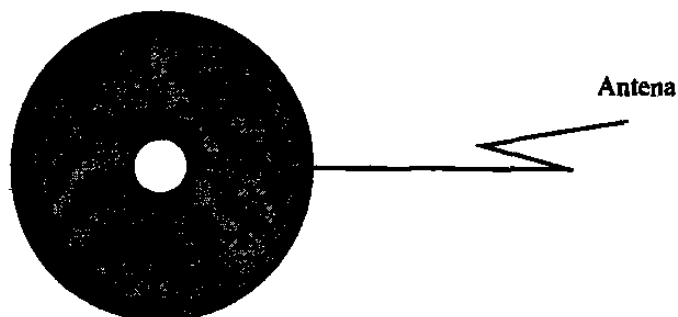


Fig. 7.6 Patrón de radiación de la portadora de referencia

La antena esta diseñada eléctricamente para aceptar las tres señales de R.F. aplicadas a diferentes partes. La portadora de referencia es alimentada en fase a las cuatro ranuras. Cada ranura produce un lóbulo de energía de R.F. y debido a que los cuatro lóbulos están en fase estos combinados en el espacio originan uno más grande, de modo que tiene un patrón circular de R.F. alrededor de la antena como se muestra en la figura 7.6.

Cada una de las señales variables de bandas laterales es alimentada únicamente a un par de ranuras. Un par de ranuras consiste de dos ranuras opuestas que se encuentran físicamente colocadas una frente a otra dentro del cilindro metálico, los pares son llamadas NW-SE (noroeste - sureste) y NE-SW (noreste - suroeste), la R.F. es alimentada simultáneamente a ambas ranuras de cada par, pero estas originan señales en el espacio con 180° fuera de fase, como se muestra en la figura 7.7 donde se trazan las líneas de fuerza de cada ranura.

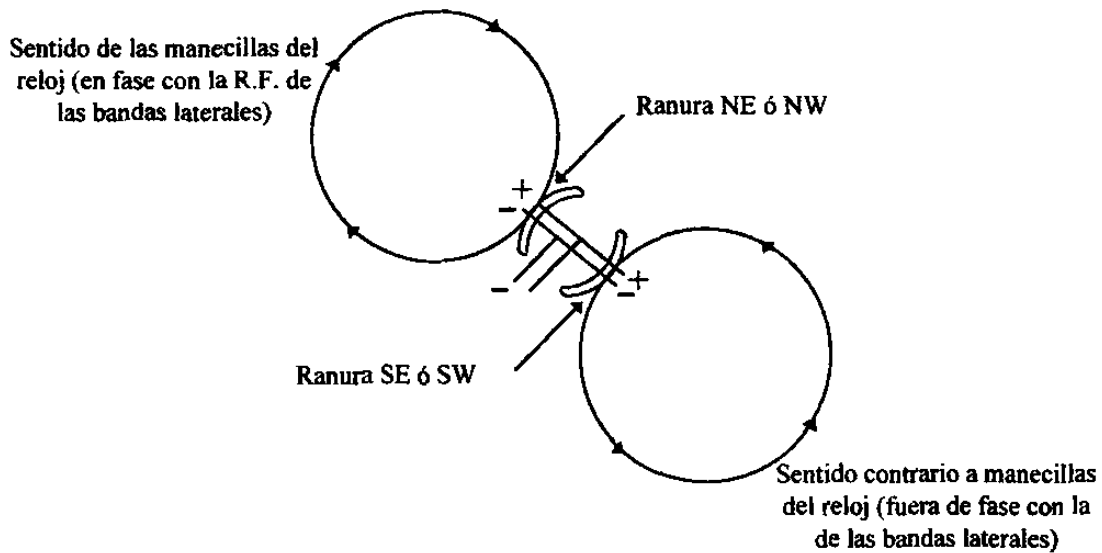


Fig. 7.7 Patrón de radiación de un par de ranuras

Cada uno de los pares de ranuras están conectados internamente dentro del cilindro, así los dos lados opuestos de cada ranura tienen la misma polaridad. Las flechas

representan el sentido del movimiento de la R.F. fuera de la antena, observándose que un campo gira en sentido de las manecillas del reloj y el otro campo en dirección opuesta. Debido a esto se tiene 180° fuera de fase entre las ranuras de cada par.

7.1.5.1 FIGURAS DE OCHO CRUZADAS

Cuando una banda lateral variable es alimentada al par de ranuras NE-SE, se radia un lóbulo de R.F. hacia el noreste y un lóbulo de R.F. de la misma amplitud pero con fase opuesta hacia el suroeste. Si se alimentan al otro par de ranuras con la señal variable de banda lateral, se obtendrán también dos lóbulos de R.F. de la misma amplitud con fase opuesta, pero hacia el noroeste-sureste. La resultante puede dibujarse como un par de ochos cruzados.

Las dos figuras de ochos combinadas crean un patrón de radiación en forma de ocho sencillo. Por ejemplo, si las señales radiadas desde las ranuras NW-NE tienen igual amplitud e igual fase, mientras que las señales radiadas desde las ranuras SW-SE tienen igual amplitud e igual fase, pero estas están a 180° fuera de fase con respecto a las primeras. La resultante es una figura de ocho sencillo con un lóbulo orientado hacia el norte y el otro lóbulo orientado hacia el sur, que tiene fase opuesta.

En la figura 7.8 se muestra el patrón de radiación originado por las tres señales alimentadas a la antena

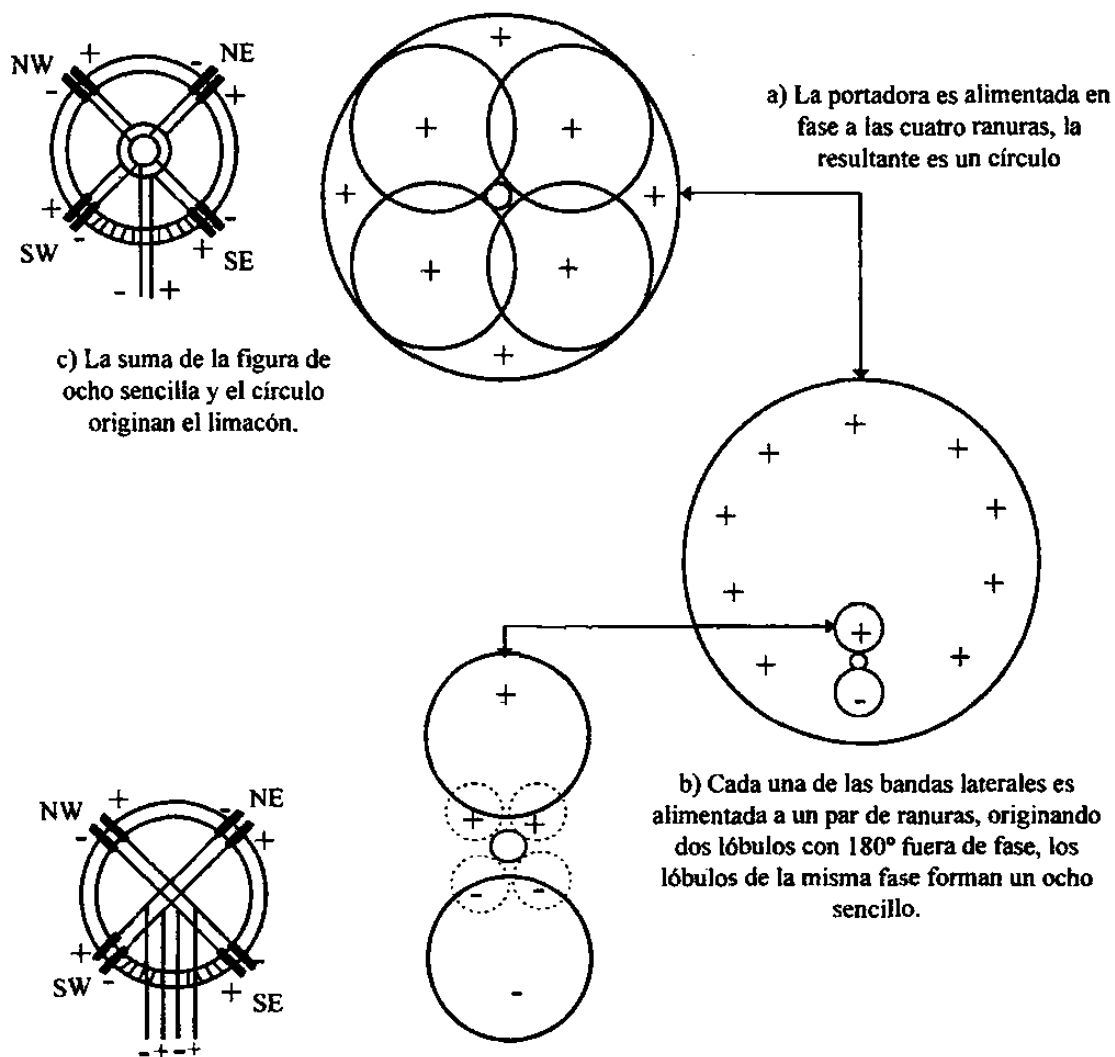


Fig. 7.8 Patrón de radiación originado por las tres señales

7.1.5.2 FIGURA DE OCHO SENCILLA

Como se ha visto, la portadora de referencia origina un patrón de radiación circular grande alrededor de la antena, mientras que la variable de bandas laterales origina una figura de ocho sencilla con los dos lóbulos de R.F. 180° fuera de fase. Uno de los lóbulos esta en fase con la portadora de referencia mientras que el otro esta 180° fuera de fase. Esto causa el desplazamiento de la portadora de referencia alrededor de la antena. Cuando la figura de ocho esta dirigido a lo largo de la línea norte-sur, y el lóbulo

hacia el norte esta en fase con la portadora de referencia, este lóbulo se suma a la portadora de referencia, mientras que el lóbulo sur (el cual esta 180° fuera de fase) se resta de ella.

Como resultado, el patrón circular de R.F. deberá ser desplazado alrededor de la radiación de la antena, creando un patrón limacón con el lado mas largo hacia el norte. Por el giro de la figura de ocho variable en sentido de las manecillas del reloj a una relacion de 30 Hz, el limacón es obligado a girar en la misma dirección y en el mismo tiempo.

Debido a la variación de la relación de fase y amplitud de las dos bandas laterales variables, la figura de ocho sencilla es obligada a girar.

7.1.6 VARIABLE DE BANDAS LATERALES

Las dos señales de R.F. de bandas laterales variables son sumadas a la referencia de R.F. en la antena y originan el giro del limacón de la señal compuesta. Estas son producidas por el goniómetro, el cual no es mas que un dispositivo de propósitos especiales como modulador de R.F.

Una porción no modulada de la señal de R.F. es alimentada al goniómetro donde es dividida en dos partes, cada mitad de la señal es modulada por separado y enviada a uno de los pares de ranuras de antena. La señal que es alimentada al par de ranuras NW-SE es llamada banda lateral verde, mientras que la señal que alimenta a las ranuras NE-SW es llamada banda lateral roja. Cada señal es una banda lateral doble con portadora suprimida, modulada por una señal de 30 Hz.

Las señales de banda lateral tienen dos fases separadas y relacionadas con la portadora de R.F. (una relación de fase de R.F. y otra relación de fase a 30Hz.). Ver figura 7.9.

7.1.6.1 RELACIONES DE R.F.

La modulación de la señal de R.F. por el goniómetro origina dos partes de R.F. cada una de 1/30 de segundo.

Una parte esta en fase con la referencia de R.F. y la otra esta 180° fuera de fase. La R.F. en cada parte cambia en amplitud desde cero a un máximo y regresa en forma de onda senoidal, pero la relación de fase es cualquier fase o fuera de fase (el cambio ocurre cuando la amplitud de R.F. es cero).

7.1.6.2 RELACIONES DE 30 Hz.

La banda lateral roja modulada a 30 Hz. se atrasa con respecto a la señal de referencia de 30 Hz, en 45°.

La Banda lateral verde modulada a 30 Hz, se adelanta con respecto a la señal de referencia de 30 Hz en 45°.

Por lo tanto, la banda lateral roja se atrasa con respecto a la banda lateral verde en 90°.

7.1.6.3 ROTACIÓN DEL LIMACÓN .

Como se ha visto, una señal de R.F. a través de una ranura de la antena origina un lóbulo de radiación de R.F.

Debido a la conexión eléctrica dentro de la antena, el lóbulo de R.F. de la ranura NW está en fase con la banda lateral verde de R.F., mientras que el lóbulo de la ranura SE es de igual amplitud pero está a 180° fuera de la fase. De la misma forma, el lóbulo de R.F. de la ranura NE está en fase con la banda lateral roja de R.F. y mientras que el lóbulo de la ranura SW es de igual amplitud pero está a 180° fuera de la fase.

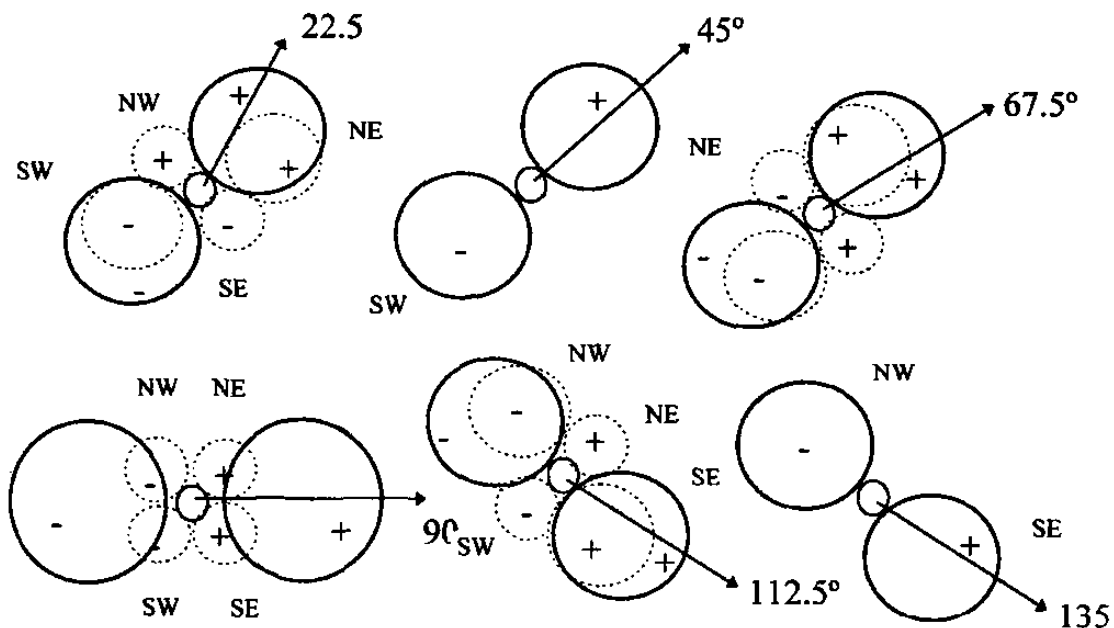
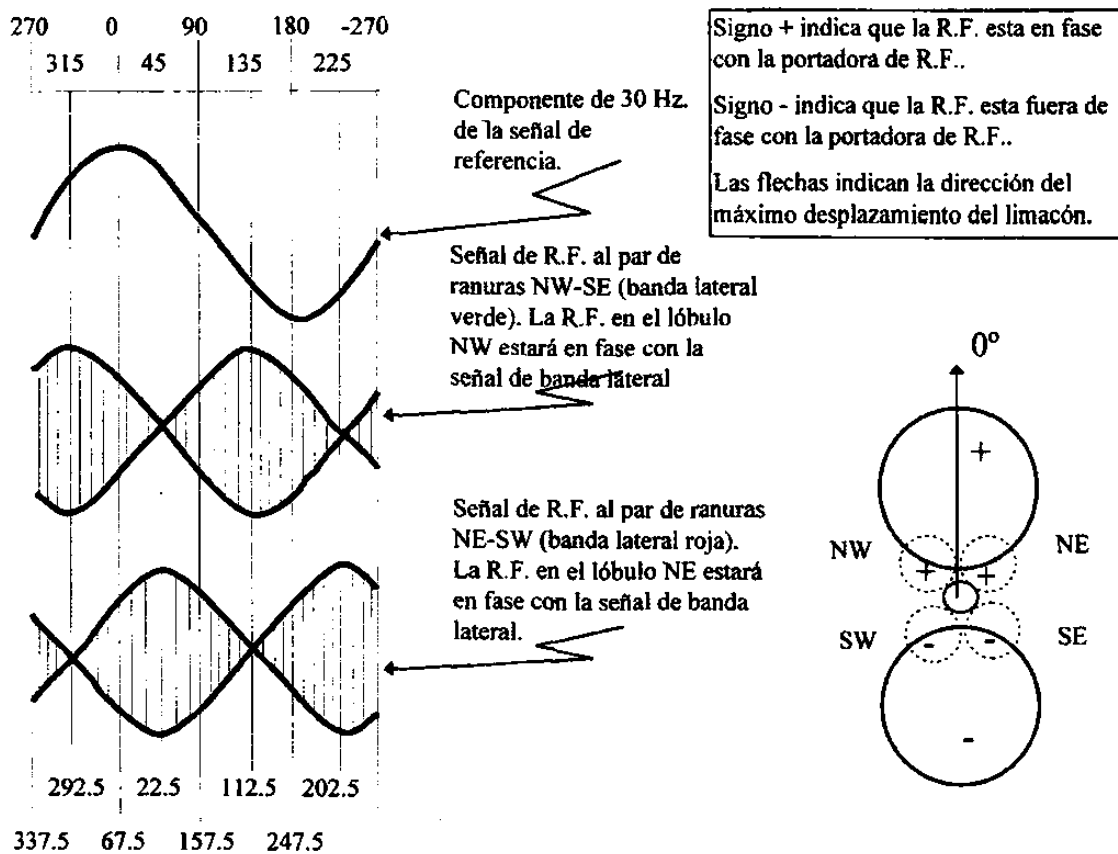


Fig. 7.9 Giro del patrón de radiación (Primera parte)

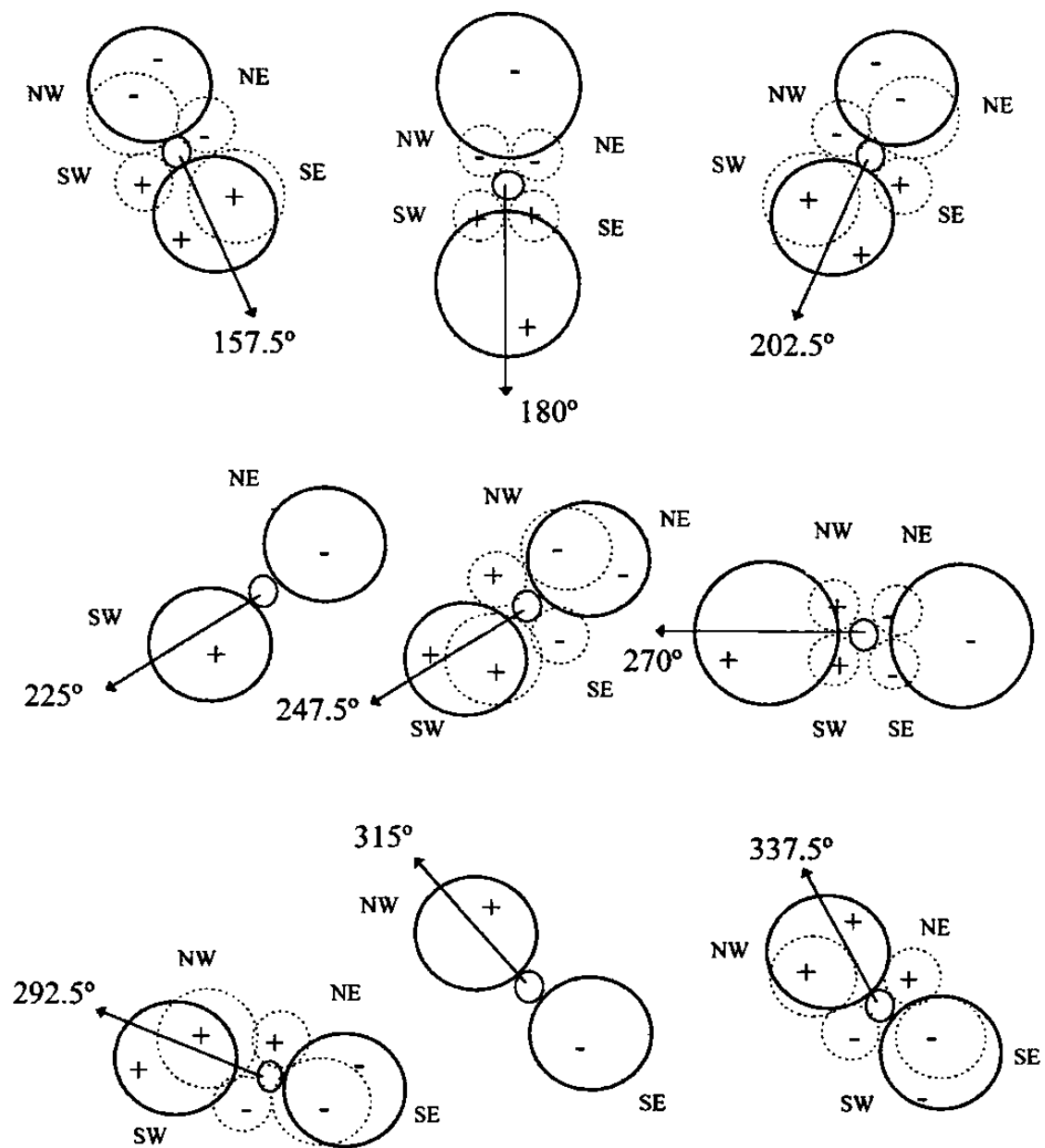


Fig. 7.9 (Segunda parte)

Cuando ambas bandas laterales variables son alimentadas a la antena, cuatro lóbulos son radiados y combinados para obtener dos lóbulos (el patrón de la figura de ocho que origina el limacón).

Cuando la señal de referencia está a cero grados (frecuencia máxima de la subportadora de referencia) la amplitud de la R.F. en las dos bandas laterales son iguales y ambas están en fase con la portadora de referencia. La resultante es un patrón con figura de ocho alineado a lo largo del radial norte sur, con el lóbulo norte en fase con la portadora de referencia. Como resultado de esto, el limacón, es desplazado hacia el norte.

Durante el tiempo en que la señal de referencia es movida desde cero hasta los 45 grados, la R.F. en la banda lateral verde cae a cero mientras que la R.F. en la banda lateral roja aumenta hasta un máximo. Como resultado, no hay banda lateral de R.F. radiada desde el par de ranura NW-SE, y la R.F. del par NE-SW se convierte en el patrón de la figura de ocho simple, así el limacón tiene su máximo desplazamiento a lo largo del radial de 45 grados.

Durante el próximo movimiento de 45 grados de la señal de referencia, la banda lateral verde aumenta mientras que la banda lateral roja decrece. En éste tiempo, no obstante, la R.F. en la banda lateral verde está a 180 grados fuera de fase con la R.F. de la portadora de referencia. Debido que la R.F. radiada desde la ranura SE está a 180° fuera de fase con la señal de entrada (banda lateral verde), esta ahora en fase con la portadora de referencia. Cuando la señal de referencia es 90 grados, la figura de ocho sencilla está localizada a lo largo del radial Este – Oeste y el limacón es desplazado hacia el Este.

Por medio de la continuación de este método de análisis, es posible conseguir el movimiento del limacón a través de los 360 grados de azimut, como creado por el cambio en amplitud y fase de las señales de R.F. de las bandas laterales.

7.1.6.4 DESCRIPCION DE LA FIGURA 7.9

La figura 7.9 ilustra muchos elementos en la creación de la señal total del VOR.

Primeramente, las tres formas de onda de la parte superior izquierda, muestran la relación entre la señal de 30 Hz de referencia (como se obtiene recuperada de la portadora de referencia) y las dos componentes de las bandas laterales de 30 Hz.

La relación de fase de R.F. de las bandas laterales con la R.F. de la portadora de referencia es ilustrada por los símbolos (+) y (-), designando con el signo + a la R.F. en fase con la portadora de referencia. El equipo de la estación de VOR es ajustado para emplear esta relación de señales como se muestran.

Las 16 ilustraciones de la R.F. radiadas desde la antena de VOR muestran primero (con líneas punteadas) la amplitud relativa y fase con los lóbulos radiados, desde las cuatro ranuras. Los círculos de líneas continuas indican la resultante de la figura de ocho sencilla, mientras que las flechas muestran la dirección del máximo desplazamiento del limacón.

Ahora se puede ver como se obtiene la relación de fase entre la señal de referencia de 30 Hz, y la señal variable de 30 Hz. Las bandas laterales variables están funcionando en un tiempo exacto para originar el máximo desplazamiento del limacón, por ejemplo, en un punto radial de 90° en el momento cuando la señal de referencia de 30 Hz ha completado $90/360$ de ciclo. El desplazamiento máximo del limacón está en el pico de la señal variable en ese punto.

Esto puede ser variando primero haciendo referencia a la gráfica superior izquierda de la ilustración. Cuando la señal de referencia está a 90° , la R.F. en la banda lateral verde está a 180° fuera de fase con la R.F. de la portadora de referencia. En el mismo punto y momento, la R.F. en la banda lateral roja está en fase con la R.F. de la portadora de referencia y es de la misma amplitud que la banda lateral verde.

El patrón de radiación a los 90° muestra igual amplitud de los lóbulos de cada ranura. Los lóbulos NE y SE están en fase con la R.F. portadora de referencia, mientras que los lóbulos NW y SW están fuera de fase. La figura de ocho sencilla está dirigida con el lóbulo positivo hacia el radial 90° causando el máximo desplazamiento del limacón en esa dirección. La señal variable de 30 Hz, por lo tanto, se atrasa con respecto a la señal de referencia de 30 Hz en 90° .

El mismo método de análisis puede ser usado para cada uno de los patrones de radiación.

7.1.7 MODULACIÓN EN LA ANTENA DE RANURA

La información hasta aquí indicada, describe la portadora de referencia y la variable de las bandas laterales como radiándose separadamente desde la antena y combinándose en el espacio para producir la señal del VOR. Actualmente las señales son combinadas en la antena (la portadora de referencia es modulada por la variable de bandas laterales alrededor de las ranuras).

7.1.7.1 CORRIENTE DE RANURA

En efecto, cuando una señal de R.F. es aplicada a una antena de ranura, fluye una corriente alrededor de la ranura creando un voltaje a través de esta. El potencial en movimiento, origina la señal radiada, cuando una corriente grande circula alrededor de la ranura, la señal de R.F. radiada es grande.

La energía radiada esta polarizada horizontalmente debido a que es originada por las corrientes horizontales a través de la parte superior e inferior de las ranuras. La radiación de polarización vertical, la cual no es deseable será originada por las corrientes verticales a cada lado de las ranuras, pero son canceladas debido a lo angosto de la ranura.

Cada una de las cuatro ranuras tiene dos señales de R.F. aplicadas (la portadora de referencia y una de las bandas laterales). En las ranuras NE y NW, cuando la R.F. de las dos señales están en fase las corrientes desde cada una fluirán en la misma dirección sumándose y aumentando la señal radiada. Como la R.F. de banda lateral variable cambia en amplitud, la cantidad de flujo corriente origina una relación de cambios de dirección, y así es radiada la R.F.

Cuando la señal de banda lateral variable invierte su fase, la corriente fluirá en dirección opuesta a la de la portadora de referencia, restándose de esta y reduciendo la salida radiada. Debido a que la potencia de la banda lateral variable es considerablemente menor que la portadora de referencia, la corriente que fluye nunca será cancelada completamente y habrá siempre una salida de R.F. En las ranuras SE y SW, las señales de banda lateral variable están conectadas de tal modo que cuando las dos señales de R.F. están en fase, las corrientes desde cada una fluirán en direcciones opuestas, disminuyendo la corriente total y reduciendo la señal radiada. Cuando las señales de R.F. en la banda lateral invierten su fase (estando 180° fuera de fase con la portadora de referencia) las corrientes fluyen en la misma dirección, llegando a ser sumadas y aumentando la señal de R.F. radiada.

7.1.7.2 SALIDA DE LA RANURA

La señal total del VOR es una portadora de R.F., modulada en amplitud al 30% por la señal variable de 30 Hz, al 30% por la subportadora de referencia, al 5% por el tono de identificación, y cuando se utilice al 30% por la señal de Voz.

Como en la condición anterior, todas las señales excepto la señal variable son moduladas por el transmisor por medios convencionales.

La señal de R.F. modulada desde el transmisor (portadora de referencia) esta aplicada igualmente a las cuatro ranuras, y sin la suma de las bandas laterales, aumenta y disminuye la amplitud de la salida de R.F. de la ranura en un 15%, o un total de 30% de cambio en amplitud. Este es el 30% de la modulación de la ranura.

Debido a la diferencia de amplitud y fase entre las dos bandas laterales variables, y la diferencia de fase de 180° en el camino, cada una es alimentada a ranuras opuestas de cada par, los cuatro lóbulos de energía de R.F. radiada varia en amplitud a diferentes momentos. La relación creada por el goniómetro provee el giro del limacón. Aunque es

posible determinar como se hace, se sugiere que se piense en el giro del limacón en términos de señales radiadas separadas.

Aunque hay cuatro lóbulos separados de energía de R.F. en el espacio, transmitidos por la antena, a una distancia aproximadamente igual a cuatro longitudes de onda de la antena (aproximadamente 36 pies) los lóbulos son combinados, así; a esa distancia y más allá aparecerá únicamente una señal radiada.

7.2 EQUIPO MEDIDOR DE DISTANCIA

7.2.1 GENERALIDADES.

Esta sección describe la estación terrestre del Equipo Medidor de Distancia (DME) "Distance Measure Equipment". Este equipo, mas el suministrado para ser usado o bordo del avión, componen un sistema. El interrogador en el avión transmite pulsos hacia el DME en tierra. El DME responde a los pulsos. El interrogador mide el lapso de tiempo entre la interrogación y la respuesta, el cual es proporcional a la distancia entre la interrogación y la estación de tierra. El interrogador, en el avión comanda a un indicador en el que aparece la distancia en millas náuticas en forma continua.

El DME tiene tres propósitos:

- a) El DME se usa con una estación de tierra VOR. En tal caso usa una antena de irradiación omnidireccional
- b) El DME se usa con un ILS como ayuda de aeropuerto. En ese caso puede utilizar una antena ya sea direccional u omnidireccional

- c) El DME se usa como una estación independiente. Entonces utiliza una antena omnidireccional

7.2.2 FUNDAMENTOS DE OPERACION

El sistema opera en la gama UHF, entre 962 y 1213 MHz y se sintoniza en incrementos de 1 MHz. Cada incremento del interrogador tiene asignado un número de canal al que va apareada una frecuencia distinta de respuesta, de acuerdo a las especificaciones establecidas en el Anexo 10 de OACI (Organización Internacional de la Aviación Civil), el espaciamiento de los pares de impulsos de interrogación y respuesta también concuerdan con las especificaciones contenidas en dicho Anexo.

Cada interrogador transmite pares de impulsos a un régimen constante (aproximadamente 30 pares de impulsos por segundo) y espera las respuestas de la estación de tierra. Las interrogaciones y respuestas guardan una relación de tiempo distancia. Para que el equipo de abordaje comience a suministrar una lectura de distancia, el interrogador debe recibir varias respuestas de interrogación en la misma relación tiempo-distancia. Cuando existe indicación de distancia se dice que el sistema está "enganchado" o en rastreo. Otras interrogaciones de otros aviones no afectarán al sistema porque la relación tiempo-distancia no es la misma. El transpondedor radia una señal de identificación para que la tripulación sepa qué DME está sintonizando.

7.2.2.1 RETARDO DE TIEMPO DEL SISTEMA

Existen tres razones principales para agregar este retardo en el transpondedor, por lo tanto el valor de 50 μ seg se eligió mas o menos arbitrariamente.

1) Después que una estación terrestre recibe una interrogación se requiere una cierta cantidad de tiempo para descifrar la interrogación e iniciar una respuesta, la cual se debe a un retardo de tiempo de los circuitos internos. Después que una respuesta se ha iniciado en el transpondedor, un retardo de tiempo adicional para responder se introduce en un circuito de retardo de tiempo en el transpondedor. El retardo de tiempo de la respuesta total se ajusta para que sea igual para todos los respondedores. El retardo de tiempo del sistema se mide desde el segundo pulso descifrado al segundo pulso de respuesta y se ajusta a $50 \mu\text{s}$.

2) La segunda razón para estandarizar el retardo del tiempo interno dentro del transpondedor es para compensar los diferentes retardos de tiempo inherente entre diferentes transpondedores. Cada transpondedor requiere tiempo para procesar una interrogación y transmitir una respuesta. Este tiempo de proceso varía entre diferentes transpondedores y esta variación si no se compensa, introduciría un error a la información de distancia recuperada por el avión. En este caso, un avión pudiera recibir diferente información de distancia entre dos transpondedores colocados en el mismo sitio. Se establece un retardo de tiempo total ($50 \mu\text{s}$) Suficientemente largo para ser mayor que cualquier retardo de tiempo natural que se encuentra en todos los transpondedores, permitiendo la calibración de los interrogadores del avión para compensar esta cantidad de tiempo. Las dos razones para el retardo del sistema mencionado más arriba no requeriría un retardo tan largo como $50 \mu\text{s}$.

3) La tercera razón para un largo retardo del sistema, es para proveer la sustracción de un retardo de tiempo para aplicaciones especiales en la función de medición de distancia para el DME. Por ejemplo, la información de distancia suministrada por un DME en conjunto con un ILS requiere que la indicación de cero millas estuviera en el punto de aterrizaje, (umbral) esto requiere que el DME este colocado en el campo cerca del punto de aterrizaje. Si esta ubicación presentara un

peligro, es posible, teniendo un largo retardo del sistema, ubicar el transpondedor más allá de la parte de aterrizaje en un aeropuerto. Esto se pudiera hacer quitando un microsegundo de retardo de tiempo del sistema por cada 150 metros que el DME está ubicado del punto de aterrizaje. Sin un retardo de tiempo del sistema más largo que el máximo requerido para tener una distancia de cero millas, esta fracción no sería posible.

7.2.2.2 IDENTIFICACIÓN.

El transpondedor transmite su identificación en código morse. La estación envía identificación en cada cuarto de revolución del manipulador de identificación del VOR. Una señal de 1350 Hz establece la frecuencia de identificación mediante la activación de un grupo de impulsos de identificación por cada ciclo de la fuente de 1350 Hz. Un circuito resonante de 1350 Hz, en el equipo del avión, detecta este grupo de impulsos para recuperar el tono de 1350 Hz durante cada carácter de identificación.

7.2.3 TREN DE PULSOS DE SALIDA.

La señal de salida del transpondedor consiste de un tren de pares de pulsos. Algunos de estos pulsos son parte del tren de identificación, algunos de ruido codificados y por lo tanto, son intermitentes o espurios y otros son respuestas a interrogaciones. Cuando el tren de pulsos se conoce, es más fácil visualizar el requerimiento total del circuito del transpondedor; el cual produce este tren de pulsos. Toda la información irradiada desde el transpondedor comprende pares de pulsos. Un par de pulsos, teniendo 12, μ s entre pulsos, es la unidad básica de radiación para el transpondedor.

La información de identificación y respuestas están compuestas de estos pares de pulsos

7.2.3.1 PULSOS ESPURIOS DE RUIDO “SQUITTER”.

Es posible que las respuestas a interrogaciones no provean suficientes pulsos, para mantener la salida del transmisor. Para ayudarle a la envolvente de modulación, se introducen pulsos al azar (aleatorios) al tren de pulsos para rellenar los espacios anchos entre pulsos. Estos pulsos aleatorios, los cuales se inician de pulsos de ruidos en el descifrador-cifrador (DECODER-ENCODER) se llaman pulsos codificados de ruido intermitentes (SQUITTER). En la ausencia de interrogaciones existirán 1000 pares de pulsos por segundo, de pulsos intermitentes en la salida del tren de pulsos. Cuando se reciben interrogaciones por el transpondedor, las respuestas a estas interrogaciones se agregan a los pulsos intermitentes. Cuando se transmiten aproximadamente 2700 respuestas a interrogaciones por segundo no se transmiten pulsos de ruido porque los 2700 pares de pulsos por seg. , Se acercan a la limitación del diseño del DME. 2700 respuestas por seg. , Son suficientes para suministrar información a aproximadamente 100 aviones. El espacio promedio cuando se transmiten 2700 pares de pulsos por segundo es $1/2700 = 370 \mu s$.

7.2.3.2 PULSOS DE RESPUESTA A INTERROGACIONES.

Interrogaciones desde cualquier avión ocurren aleatoriamente aproximadamente 25 veces por seg. Esto es un espaciamiento promedio de $1/25 = 40,000 \mu s$. (esto supone que el interrogador está en rastreo). Mientras el interrogador está en búsqueda, la razón de interrogación es aproximadamente 120 a 150 interrogaciones por segundo. Una respuesta a una interrogación se puede encontrar entre los pares de pulsos de ruido intermitentes. Es imposible distinguir entre pulsos intermitentes y pulsos de respuestas a los aviones durante la observación del tren de pulsos totales. Por lo tanto, el tren de pulsos también contiene pares de pulsos de respuestas a interrogaciones que son generadas por los circuitos del monitor del DME.

7.2.3.3 PULSOS DE IDENTIFICACIÓN.

Cuando un caracter se esta manipulando durante la identificación, los pulsos ocurren de una manera uniforme. Nada se transmite durante estos grupos de pulsos de identificación durante intervalos cortos, los cuales son de 0.125 segundos en duracion para el punto y 0.325 segundos para una raya. Entre los intervalos del punto y la raya se transmiten pulsos intermitentes y respuestas.

Grupos de pulsos de identificación durante el intervalo del punto y la raya ocurren a una razón de 1350 Hz y la frecuencia de identificación de 1350 Hz es recuperada en el avión por un circuito resonante a 1350 Hz. Si cada grupo consistiera solamente de un par de pulso, entonces solamente se transmitirían 1350 pares de pulsos por segundo durante los intervalos de punto y raya. Para mantener el coeficiente de utilización más constante durante estos intervalos se transmite otro par de pulsos de 100µs antes o después de cada par de pulsos de identificación para un total de cuatro pulsos en cada grupo. De esta manera se transmiten 2700 pares de pulsos por segundo durante caracteres de identificación. Si se expanden dos grupos de pulsos de identificación para mostrar el espaciamiento entre pares de pulsos y grupos, el espaciamiento entre grupos es $1/1350 = 740.7 \mu s$ y el espaciamiento entre dos pares de pulsos de cada grupo es $100 \mu s$. El segundo par de grupos de cada grupo de identificación se agrega solamente para mantener el coeficiente de utilización del transmisor constante. Entonces, su espaciamiento de $100 \mu s$ desde el primer par del grupo puede variar arbitrariamente y no es crítico para transmisión y recepción propia de la información de identificación.

La cuenta de salida del pulso del respondedor es 2700 pares de pulsos por segundo, cuando el transpondedor se coloca en tono continuo.

7.3 RADIOFARO NO DIRECCIONAL (NDB)

7.3.1 INTRODUCCION

Radiofaro es el nombre genérico dado a las estaciones radioemisoras que sirven como ayudas a la navegación aérea y permiten y a una estación móvil determinar su marcación (azimut) o dirección con respecto a él. Dependiendo de las formas en que sus patrones de radiación se proyectan en el espacio y de las frecuencias que utilizan los radiofaros se subdividen en:

1. Radiofaro no direccional (NDB)
2. Radiofaros direccionales (RADIOGUIAS)
3. Radiofaros omnidireccionales (VOR)

7.3.2 GENERALIDADES

El radiofaro no direccional (Non Directional Beacon) (NDB) es una estación transmisora que radia su energía en forma circular en todas direcciones, sin producir trayectorias definidas en el espacio. Su antena vertical, generalmente una torre metálica, permite radiar la mayor porción de la energía en forma de onda terrestre (polarizada verticalmente) con el objeto de reducir al mínimo la posibilidad de refracción ionosférica que produzca interferencias.

Las emisiones de las NDB son captadas por el radiogoniómetro de abordaje, la aguja de la cual se orienta hacia la dirección de donde provienen las ondas de la estación sintonizada. De esta forma se obtiene la marcación de la aeronave y su dirección respecto al radiofaro.

7.3.3 FRECUENCIAS ASIGNADAS.

Las radiofrecuencias asignadas a los NDB se seleccionaran de las bandas de 200 a 415 KHz y de 1605 a 1750 KHz. La tolerancia de frecuencia será de 0.01%, pero

aquellos NDB con potencias superiores a 200W y que utilicen frecuencias mayores de 1605 KHz, tendrán una tolerancia de 0.005%.

Todos los NDB radiaran una portadora ininterrumpida y se identificarán telegráficamente por interrupción de un tono de modulación de amplitud. La frecuencia del tono para la identificación será de 1020 Hz o de 400Hz.

7.4 EL TACAN

7.4.1 INTRODUCCION

EL TACAN (Tactical Air Navigation) es una ayuda radioeléctrica para la navegación aérea establecida según el principio de las coordenadas polares que proporciona a los aviones la marcación, generalmente en relación con el norte magnético y la distancia de una baliza terrestre elegida por el piloto, datos leídos en un indicador de navegación. Estas funciones son idénticas a las obtenidas mediante el sistema civil VOR-DME (VHF Omnidirectional Range-Distance Measuring Equipment) normalizado por la OACI, (Organización Internacional de la Aviación Civil) presentando ambos sistemas una compatibilidad absoluta por lo que se refiere a la función de distancia, pero contrariamente a lo que ocurre en el VOR-DME, ambos datos, es decir marcación y distancia se obtienen mediante la misma señal.

EL TACAN es un sistema de navegación en ruta que permite una navegación precisa en las zonas de circulación aérea en que los equipos de navegación a estima (Doppler o inercia) llegan a ser insuficientes y fundamentalmente para los procedimientos de aproximación y penetración de nubes. EL TACAN es el sistema de navegación normalizado de las fuerzas aéreas y aeronavales de varios países y fundamentalmente los países de la OTAN (Organización del Tratado del Atlántico Norte).

El desarrollo del TACAN fue iniciado a principios de los años 50 por parte de la marina estadounidense, que precisaba disponer de un sistema capaz de proporcionar a los aviones embarcados la marcación de los portaviones. El VOR no era conveniente para esta aplicación debido en primer lugar a su frecuencia que requiere antenas de grandes dimensiones y en segundo lugar debido a su gran sensibilidad a las dimensiones de las superestructuras de los portaviones. Por el contrario, dado que el TACAN es un sistema de impulso, queda menos sujeto, por la naturaleza propia, que el VOR, que como es sabido, es un sistema de ondas mantenidas en las cuales una interferencia, incluso reducida, puede introducir importantes errores de marcación. Las presentaciones obtenidas por el TACAN permiten obtener precisiones del orden de un grado para la marcación y de una décima de milla náutica para la distancia.

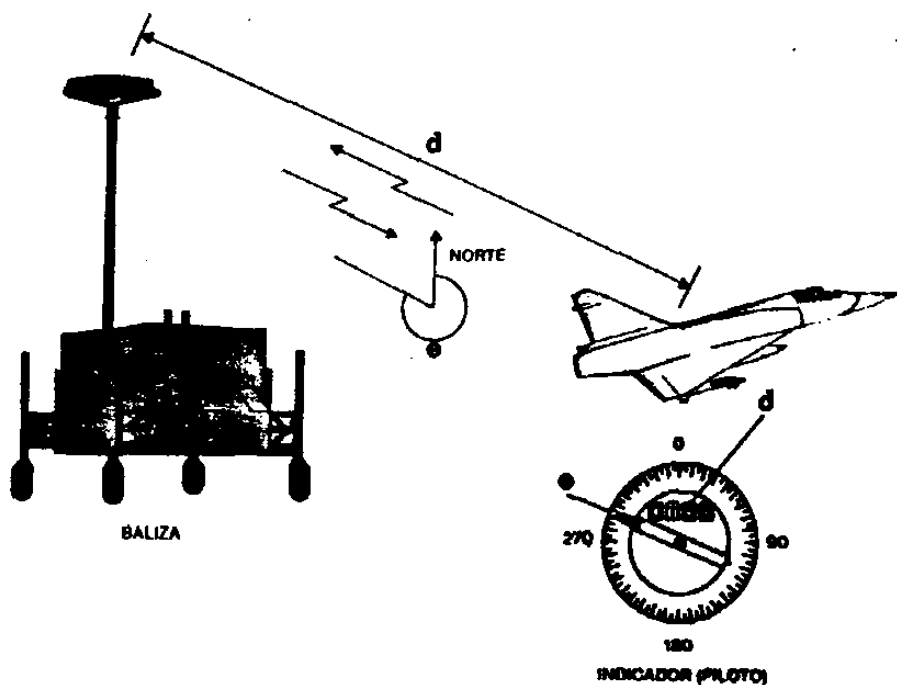


Fig. 7.10 Principio de operación del TACAN

En la figura 7.10 se muestra el principio de operación del TACAN.

La NASA a adoptado el TACAN para la fase crítica de aproximación del modulo espacial el cual esta dotado de tres equipos TACAN de abordó. Se trata también del único medio preciso que se ha podido utilizar hasta la fecha para la medición de la altitud del modulo inmediatamente después del black-out radio que se produce en el momento de la entrada en la atmósfera. Cabe también destacar que el TACAN puede responder a ciertas necesidades civiles, como la navegación hacia las plataformas petroleras en las cuales las dimensiones de las antenas VOR no son compatibles en los espacios disponibles, y asimismo, para la navegación en montaña en cuyo caso resiste mejor que el VOR, una vez mas, a las reflexiones.

7.4.2 MEDICIÓN DE LA DISTANCIA

TACAN es un sistema combinado multicanales que consta de una baliza terrestre formada por un emisor-receptor sintonizado a un canal acoplado a una antena omnidireccional y así mismo, a un dispositivo de control y un equipo de a bordo emisor- receptor conectado con las antenas de abordó y que controla los indicadores de navegación.

La distancia se obtiene por la medición de los tiempos de propagación de una señal que efectúa una ida y vuelta entre el equipo de abordó y la baliza: el equipo de a bordo interroga a la baliza según la frecuencia y la baliza responde según otra frecuencia, mientras que el equipo de abordó mide el tiempo transcurrido y deduce la distancia.

Las señales intercambiadas corresponden a impulsos que modulan una portadora de la banda L (1 GHz). Las frecuencias de interrogación y respuesta quedan siempre separadas de 63 MHz. Para cubrir un territorio como el de Europa Occidental sin problemas de interferencia, es preciso disponer de un centenar de balizas y por consiguiente, de un centenar de canales, o sea 200 frecuencias con una correcta

separación entre canales colindantes. Ello ha conducido a definir una forma de impulso gaussiano de $3.5 \mu\text{s}$ de anchura a semiamplitud, que presenta la ventaja de ocupar un espectro de frecuencia estrecho y espaciar las frecuencias utilizadas de 1 MHz. La banda de frecuencias atribuidas es de 962 a 1213 MHz y se han definido así 126 canales, o sea 252 frecuencias.

Para mejorar la relación señal/ruido en la recepción y disminuir el efecto de los impulsos parásitos, se ha duplicado el impulso TACAN, con una separación precisa entre los dos impulsos del par. De este modo, los impulsos simples aislados o los pares codificados distintamente, no pasan hacia el descodificador de los receptores de a bordo o de tierra. Esta particularidad se ha aprovechado para duplicar el número de canales TACAN utilizables, definiendo dos géneros de codificaciones. Así, cabe establecer la distinción entre los canales Y y los canales X, que corresponden a los 126 canales de origen.

Cada baliza tiene una capacidad de respuesta correspondiente a un centenar de aviones y cada avión debe interrogar a unas 30 veces por segundo para obtener una distancia valedera: por consiguiente, una baliza debe poder emitir hasta 3000 pares de impulsos por segundo. Para evitar las variaciones de carga de los emisores y permitir un funcionamiento correcto de control automático de ganancia de los receptores de los equipos de abordaje las balizas emiten de forma permanente 2700 pares de impulsos que se distribuyen de forma aleatoria y sustituidos por respuestas cuando el receptor recibe interrogaciones de avión. En caso de que el número de aviones que interrogan sea superior a 100, la ganancia del receptor de la baliza queda reducida, con objeto de responder únicamente a las 100 interrogaciones más fuertes.

La baliza emite un indicativo (identificación) manipulado en Morse cada 30 segundos. Las respuestas quedan entonces suprimidas a los 2700 impulsos se emiten según una frecuencia fija y no aleatoria durante la duración de los puntos y rayas de indicativo. Un filtro existe con el equipo de abordaje reconstituye una señal audible que

responde al indicativo de la baliza. La información de distancia que no se encuentra disponible durante estos cortos periodos queda debidamente memorizada.

Las potencias aplicadas han oscilado hasta la fecha entre 3 y 5 kW cresta (pico) para las balizas de infraestructura y de 2 kW cresta, como máximo, para los equipos de a bordo, lo cual corresponde a un alcance 300 millas náuticas en espacio libre. Con la mejoría en la sensibilidad de los receptores, tanto en tierra como abordo de la aeronave. Se puede obtener actualmente alcances idénticos pero con potencias de emisión más reducidas.

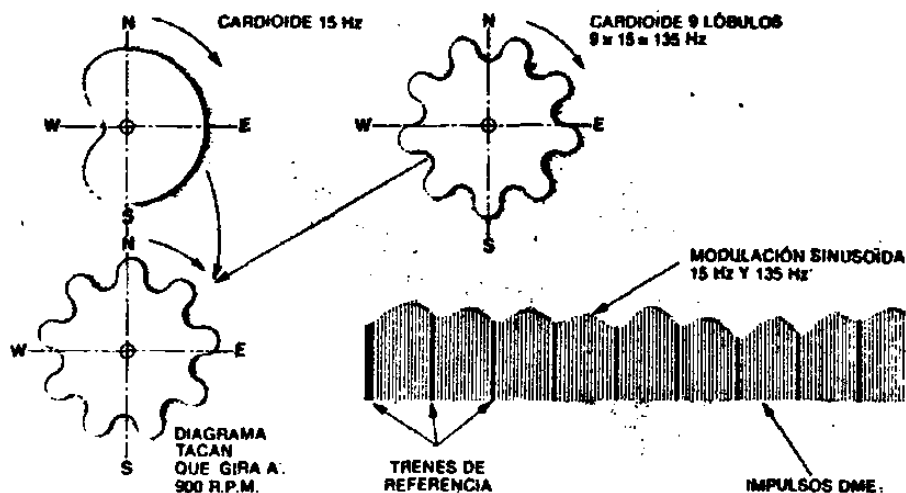


Fig. 7.11 Modulación del TACAN

Todas estas características son idénticas entre el sistema TACAN y el sistema DME de la OACI. La baliza DME queda siempre combinada con una baliza VOR que funciona con VHF y que proporciona la marcación. Dado que la medición de distancia es únicamente utilizada en la posición de amplitud de dichos impulsos la cual puede ser utilizada entonces para transmitir una información suplementaria. La función de marcación del TACAN corresponde a este principio.

7.4.3 MEDICIÓN DE LA MARCACIÓN

Por modulación de amplitud (modulación sinusoidal) de los impulsos emitidos en la antena de baliza TACAN proporciona la información de marcación (azimut). No obstante, es preciso combinar esta modulación sinusoidal, de cuya fase medida por el equipo de abordaje representa la marcación de la baliza TACAN, una señal de origen de las fases que se presenten en forma de trenes de impulsos particulares, emitidos por los pares de impulsos y denominados trenes de referencias principales. La modulación se obtiene por rotación del diagrama de antena que, para que la modulación sea sinusoidal, deberá de corresponder al tipo de cardioide. Este diagrama giratorio se puede producir por rotación mecánica de un ramal conductor en torno del sistema de irradiación omnidireccional de la antena. La velocidad de rotación de la antena corresponde a 900 r.p.m., lo cual produce una modulación de 15Hz como se muestra en la figura 7.11.

Este tipo de funcionamiento es análogo al del VOR, pero como las frecuencias correspondientes corresponden a una relación de 10, ocurre lo mismo para las antenas. Esta ventaja de una dimensión mas reducida acarrea una reducción de la base de la antena, la cual no es nada favorable por lo que se refiere a la precisión. Para poner remedio a ello, el TACAN utiliza un sistema de doble modulación que no solo elimina este inconveniente sino que también permite obtener globalmente una precisión superior. A la cardioide de lóbulo único de la antena se viene a superponer un diagrama de 9 lóbulos secundarios obteniendo por rotación a 900 r.p.m. de un conjunto de 9 ramales, ya que el radio de rotación es superior a aquel del ramal único de la cardioide de un lóbulo. Este diagrama giratorio de 15Hz produce por consiguiente una doble modulación: 15 Hz y su armónica 9, o sea 135Hz.

Así cuando un avión progresa según un arco de azimut de 40° , lo cual corresponde a la anchura de un lóbulo secundario ($360^\circ / 9 = 40^\circ$), la fase de la modulación de 15 Hz varía efectivamente de 40° , pero en cambio, la fase de modulación de 135 Hz varía de 360° . Esta relación de 9° eléctrica para un grado geográfico único proporciona un efecto pronunciado de nonio en el proceso de medición de marcación.

Una generación de un segundo grupo de trenes de impulsos de referencia (trenes de referencias auxiliares) acompaña a esta modulación de 135 Hz. El equipo de a bordo extrae de la señal recibida las dos modulaciones, mide las dos fases correspondientes en relación con los trenes de referencia y procede a la deducción de la marcación. Para incrementar la precisión, se efectúan las mediciones en los puntos de paso positivos por cero de las sinusoides de modulación. Con objeto de que la fase medida sea nula cuando la baliza corresponde al Norte magnético del avión, se emite un tren de referencias en todos aquellos casos en que un lóbulo pasa al Este magnético, ya que únicamente se emite el tren de referencias principal cuando el lóbulo máximo es aquel que pasa al este. Por consiguiente, únicamente existe un tren de referencias principales y 8 trenes auxiliares por vuelta de diagrama.

7.4.4 BALIZAS TACAN.

Las balizas de infraestructura en Francia constituyen la base de la red nacional que consta actualmente de 30 estaciones AN/GRN 9 A (5kW cresta) para las bases principales de la fuerza aérea (cuya sustitución se ha programado ya en estaciones de 1 kW dobles), y 5 estaciones de 1 kW dobles para las balizas de la Aeronáutica Naval. Las balizas de 1 Kw en sistema simple, se han integrado en módulos de protección y constituyen el sistema móvil de la fuerza aérea (18 estaciones). La antigua antena de rotación mecánica de las balizas de infraestructura ha dejado el paso a una antena de rotación electrónica que no consta de ninguna pieza en movimiento y permite cubrir la totalidad de la banda de frecuencia.

7.4.5 EQUIPOS DE A BORDO

Los primeros equipos de abordó tenían un peso de 30 kg, consumían 300 W y precisaban dos indicadores: marcación y distancia. Las últimas generaciones pesan 10

kg, consumen menos de 70 W, y están totalmente transistorizadas y utilizan circuitos de lógica programada, controlada por microprocesador. Los datos se transmiten por dos hilos, en forma de salida numérica serie, a los indicadores que combinan marcación y distancia. Un microprocesador incorporado en el emisor-receptor efectúa procesamientos complejos para el alisado de las informaciones de marcación y de distancia, que permiten obtener mediciones precisas y estables, incluso tratándose de casos de recepción difícil, así como los cálculos de navegación de zona (marcación y distancia de un blanco distinto de la baliza, informaciones de guiado a lo largo de una ruta elegida).