

Tema 10

RADAR SECUNDARIO (SSR)



Radar Secundario (SSR)

El SSR se ha convertido en el principal sistema para proporcionar información de posición de las aeronaves al ATC, aunque se sigue utilizando el PSR como sistema de backup, lo que resulta esencial en zonas de alta densidad de tráfico para mantener los niveles de seguridad requeridos. Es decir, PSR y SSR son sistemas complementarios.

Los países de la CEAC (Conferencia Europea de Aviación Civil) acordaron en 1990 establecer unos criterios de vigilancia radar uniformes en toda la región. Esta estrategia establece la necesidad de proporcionar cobertura radar en todo el área continental Europea.

El objeto es proporcionar al ATC medios para poder mantener las siguientes separaciones:

- En Ruta: 5 NM en las zonas de alta densidad y 10 NM en el resto.
- Áreas terminales principales (TMAs): 3 NM.

Requisitos operacionales

Para poder garantizar las separaciones establecidas en el área CEAC, sin reducir el nivel de seguridad, es necesario que los radares, tanto PSR como SSR, cumplan una serie de prestaciones mínimas, además de los requisitos de cobertura anteriormente indicados.

La cobertura radar requerida por Eurocontrol para poder mantener estos niveles de separación es la siguiente:

- En Ruta: doble cobertura SSR.
- Áreas terminales principales (TMAs): doble cobertura SSR y simple cobertura PSR.

Estas prestaciones mínimas están definidas en el documento “*Eurocontrol Standard Document for Radar Surveillance in En-Route and Major Terminal Areas*” (SUR.ET1.ST01.1000-STD-01-01) y complementadas por Aena en las “Especificaciones Técnicas de SSR”.

Cobertura

- ❑ Cobertura instrumental: el sistema tendrá la capacidad para detectar y procesar blancos entre 0 y 250 NM. de distancia y entre 0 y 60.000 ft en los 360° de acimut.
- ❑ Cobertura operativa: para blancos situados en cualquier acimut, desde el horizonte visible hasta 45° de elevación y en un rango de distancias de 0.5 a 200 NM.

Exactitud

Exactitud en Distancia (R):

- Los errores sistemáticos máximos de precisión en distancia responden a la siguiente expresión: $\Delta R < 100 + 1 \text{ (m/NM)} \cdot R \text{ (NM)}$ metros.
- La distribución de los errores aleatorios de exactitud en la medida de la distancia a los blancos tendrá un valor medio igual a 0 y una desviación típica de 70 m.
- La información de distancia deberá ser suministrada digitalmente con un salto de cuantificación máximo de 1/64 NM (28.9 m).

Exactitud en Acimut:

- Se admitirá un error sistemático máximo en acimut $0,1^\circ$. La distribución de los errores de exactitud en la medida del acimut de los blancos tendrá un valor medio igual a cero y una desviación típica menor que $0,08^\circ$.

Detección

- Probabilidad de detección:** El cociente entre el número de blancos a la salida y el número total de blancos esperados debe ser $>97\%$.
- Blancos falsos:** El cociente entre el número de blancos falsos y el número de blancos detectados debe ser $<0,1\%$.
- Probabilidad de detección de códigos:** Es la probabilidad de que en cada vuelta de antena, para una aeronave dada, el sistema proporcione un plot con información correctamente validada de acuerdo con el modo de interrogación. La probabilidad de detección de códigos modo A y C es el cociente entre el número de blancos con datos de código modo A y C correcto y el número de blancos detectados.
 - Para el modo A debe ser $> 98\%$.
 - Para el modo C debe ser $> 96\%$.

Detección

- Blancos múltiples:** El cociente entre el número de blancos múltiples y el número de blancos detectados debe ser $< 0,3\%$.

- Códigos falsos:** El cociente entre el número de blancos con código falso y el número de blancos detectados con información de código. Relación global de códigos falsos $< 0,2\%$.
 - Relación de códigos falsos validados en modo A $< 0,1\%$.
 - Relación de códigos falsos validados en modo C $< 0,1\%$.

Disponibilidad

El sistema MSSR (radar secundario de vigilancia de monopulso), está preparado para operar las H24 del día durante todo el año, permitiendo como mínimo un ciclo de vida útil de 15 años.

La disponibilidad del sistema, definida como la relación entre el tiempo de operación y el tiempo total, será mayor de 0,999 en la configuración de dos canales, correspondiente a 10 horas/año fuera de servicio.

El máximo tiempo que el sistema permanecerá fuera de servicio de forma continuada será menor de 4 horas, exceptuando períodos de mantenimiento.

Disponibilidad

Para alcanzar los valores de disponibilidad antes mencionados se deben cumplir los requisitos siguientes:

- El sistema conjunto de antena (sistema de arrastre, junta rotatoria y antena propiamente dicha) tendrá un MTBF (tiempo medio entre fallos) de al menos, 40.000 horas.
- El subsistema de supervisión y control deberá permitir la localización de la unidad que presente un fallo en menos de 30 minutos.
- La detección automática de un fallo y la conmutación entre unidades electrónicas duplicadas, se realizará en menos de 2 s.

Fiabilidad

El sistema MSSR tendrá capacidad automática de protección para los principales componentes, módulos y subsistemas ante cualquier fallo producido por operaciones incorrectas o derivados del fallo de cualquier otro elemento del radar, o equipos externos conectados a él:

- El sistema tendrá la capacidad de conmutación automática de canales.
- Las funciones de detección de fallos incluidas en cada canal activarán la función de conmutación por la que el canal operativo pasa a reserva, y el canal reserva a operativo.
- El tiempo máximo de reconfiguración y restablecimiento de las salidas de datos válidas no excederá de 2s desde el instante en que se produzca el fallo.
- El canal de reserva mantendrá en la memoria las bases de datos y cualquier información crítica para que las salidas válidas puedan ser recuperadas en un periodo de tiempo mínimo.

Fiabilidad

La presentación de un fallo en un elemento que sea considerado crítico para el sistema, debe producir en la unidad de control y señalización remota una indicación en un tiempo máximo de 1s.

El radar tolerará interrupciones máximas en el suministro de energía de 10ms sin pérdida de operatividad. Para pérdidas parciales de tensión de más de 10ms, se deben preservar los datos operacionales claves y se reanudará la operación normalmente una vez restablecida la energía. Todas las fuentes internas de alimentación del sistema estarán debidamente protegidas contra sobrecargas y sobretensiones.

Mantenibilidad

Presentará los siguientes requisitos:

- Dispondrá de técnicas de diagnóstico de fallos, reparación o sustitución de cualquiera de sus partes y verificación de la correcta operación de un canal reparado sin degradación o interrupción del servicio normal del sistema.
- Es posible activar manualmente la función de conmutación de canal.
- No se requieren más de 4 horas por visita en las operaciones de mantenimiento preventivo cuya periodicidad sea inferior a 1 año. El período entre visitas no será inferior a 30 días.
- El mantenimiento preventivo será realizado sin interrumpir la operatividad del sistema, excepto el relativo a la antena y sus mecanismos de arrastre.
- El diseño del sistema debe ser tal que facilite la reducción al mínimo del tiempo empleado para la realización de las tareas de mantenimiento correctivo.

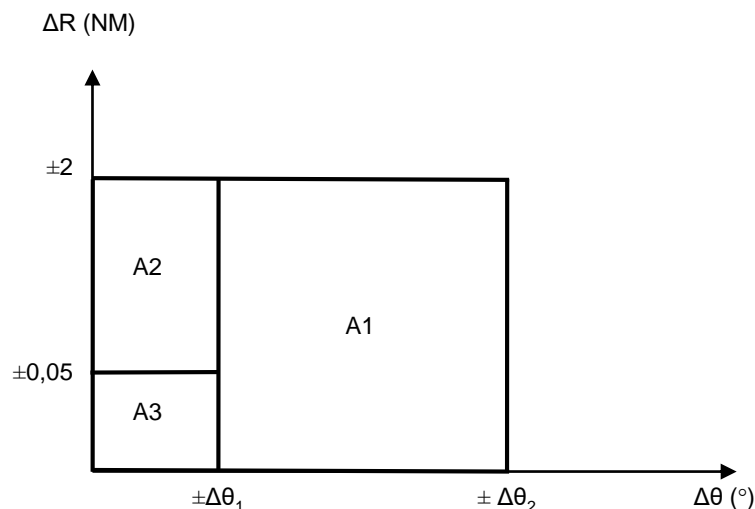
La alimentación eléctrica del sistema se realiza con tensiones comerciales (50 Hz) trifásicas a 380 V y entre fases monofásicas a 220 V.

Probabilidad de detección

Los requisitos de resolución del sistema se muestran en la siguiente tabla:

Área	A1	A2	A3
Probabilidad de detección	>98 %	>98 %	>60 %
Probabilidad de detección de códigos	>98 %	>90 %	>30 %

Según la siguiente figura, la probabilidad de detectar dos blancos cercanos depende de la separación en acimut ($\Delta\theta$) y distancia (ΔR) entre ambos; dicha probabilidad disminuye cuanto menor es la separación entre dos blancos.



$\Delta\theta$ = Diferencia de posición en acimut entre dos aeronaves.

ΔR = Diferencia de posición en distancia entre dos aeronaves.

$\Delta\theta_1 = 0,6^\circ$.

$\Delta\theta_2 = 2 \times$ ancho de haz a 3 dB.

Resolución

Suponiendo una probabilidad de respuesta del respondedor del 100%.

Las probabilidades especificadas son el cociente entre el número de blancos detectados y el número de blancos esperados dentro de cada región.

El sistema será capaz de procesar:

- Al menos 350 blancos por vuelta de antena, sin pérdida de ningún dato para un período de antena de 8s.
- 20 blancos en un sector de $11,251^\circ$ (1/32 de vuelta).
- 10 blancos en un sector de $2,81251^\circ$ (1/128 de vuelta).

El tiempo de retardo de procesamiento será inferior a 2s incluso en las condiciones más adversas de carga del sistema.

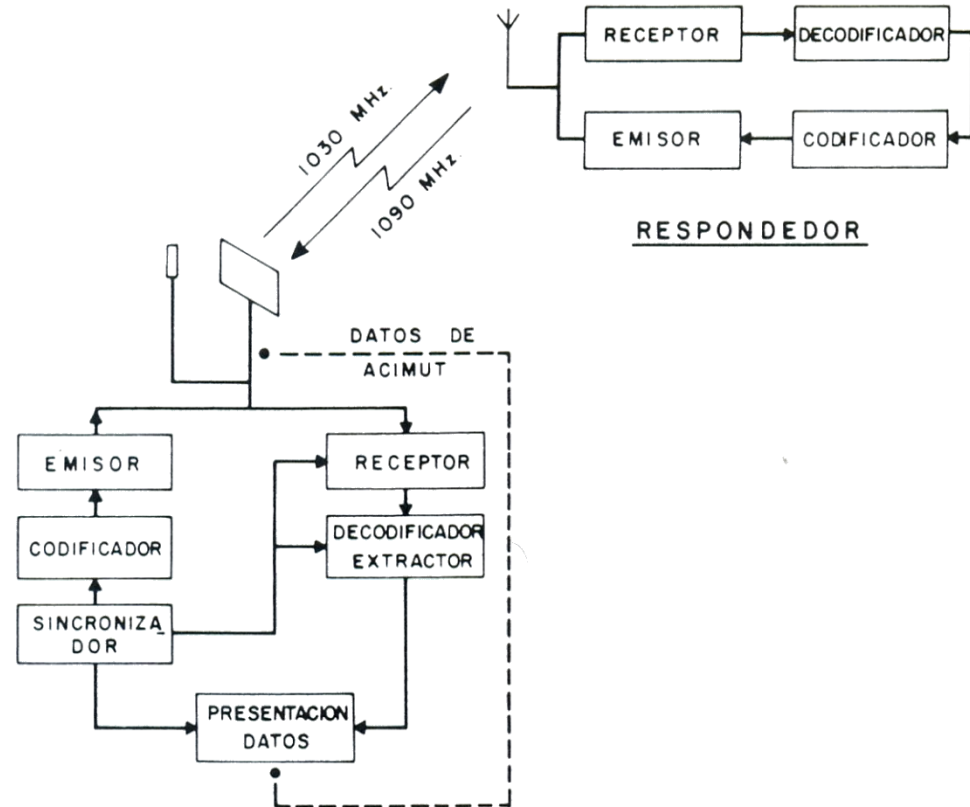
La transmisión de los datos correspondientes a los blancos detectados será capaz de soportar el formato ASTERIX.

El sistema MSSR dispondrá de un sistema de autocomprobación automático BITE con prestaciones suficientes como para detectar el 90% de los fallos y una capacidad de diagnóstico capaz de aislar un fallo en una unidad reemplazable.

Principio de funcionamiento

El sistema radar SSR, está basado en la transmisión de respuestas codificadas por parte del transpondedor a bordo de la aeronave, a partir de interrogaciones generadas por la estación de tierra.

A partir de las respuestas recibidas, la estación radar calcula los datos de acimut y distancia, de forma similar al radar primario, además de obtener información de identificación, altitud de la aeronave, etc., al decodificar las respuestas.



Principio de funcionamiento

La estación de tierra emite pulsos de RF a una frecuencia de 1030 MHz, mediante una antena giratoria que tiene un diagrama de radiación muy direccional en el plano horizontal.

Cuando el haz de la antena apunta en la dirección de una aeronave, el equipo de a bordo, denominado transpondedor, detecta la interrogación y codifica la respuesta.

El receptor del transponder detecta el tipo de interrogación, y según ésta el codificador genera la respuesta.

Esta respuesta, emitida a una frecuencia de 1090 MHz, es detectada por la estación de tierra y procesada por el extractor de plots; este equipo es el encargado de calcular la distancia y el acimut en los que se encuentra el blanco, así como de decodificar las respuestas para determinar la identidad y el nivel de vuelo de la aeronave, enviando la información al sistema de procesamiento de datos, que representará la información en una pantalla del centro de control.

Principio de funcionamiento

La utilización de un transpondedor a bordo de la aeronave posibilita que la frecuencia de la respuesta sea diferente a la de la interrogación, evitando los problemas de clutter experimentados por el PSR.

El SSR requiere una potencia de transmisión muy inferior a la del PSR, dado que la distancia recorrida por la señal a detectar será la mitad, es decir, sólo la del camino de ida. La presencia del transpondedor también permite que la señal de respuesta contenga información adicional, tal como identificación y nivel de vuelo.

Principio de funcionamiento

- ❑ La estación de tierra emite una secuencia de tres pulsos los cuales son espaciados en el tiempo (pulsos de interrogación). Los diferentes tiempos de separación de los pulsos de interrogación definen el Modo de Interrogación.
- ❑ Los pulsos de interrogación emitidos por la estación SSR son recibidos a bordo en un equipo denominado TRANSPONDEDOR.
- ❑ Los tiempos de separación de los pulsos de interrogación recibidos determinan el modo de interrogación.
- ❑ El transponder transmite de nuevo una secuencia de pulsos conteniendo información del código asignado a la aeronave o la altitud barométrica.
- ❑ La estación de tierra recibe la respuesta y la decodifica (en función de la interrogación) como un indicativo de aeronave o un nivel de vuelo.

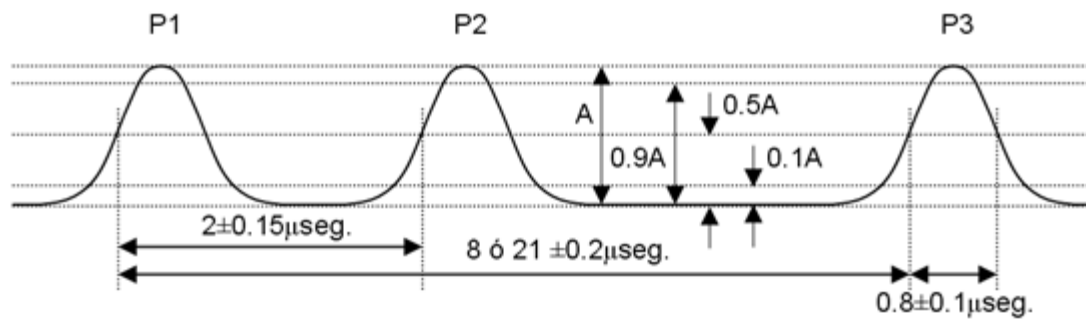
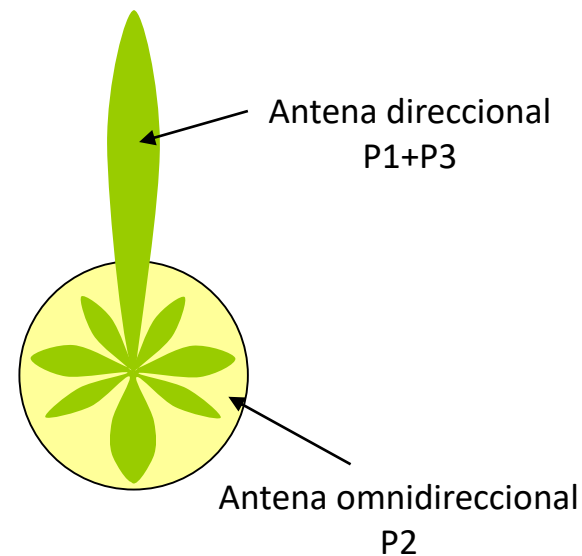
Frecuencias y velocidades de interrogación

El equipo interrogador transmite una secuencia de pulsos de radio en la frecuencia de 1030 MHz, con una tolerancia de $\pm 1,5$ MHz y a un régimen fijado por la PRF, la polarización de las transmisiones de interrogación y control es predominantemente vertical.

El transpondedor de a bordo responde en la frecuencia de 1090 MHz, con una tolerancia de ± 3.0 MHz y a un régimen comprendido entre 400 y 1.200 respuestas por segundo; transmitiendo un código seleccionado en su unidad de control y que previamente ha sido comunicado a la nave por el controlador, permitiendo la identificación positiva en la pantalla de radar.

Modos de interrogación

Modo	Aplicación	Función	T_i entre P1 y P3 ($\mu\text{seg.}$)
1	Militar	IFF	3 ± 0.2
2	Militar	IFF	5 ± 0.2
3/A	Civil/ Militar	Identificación	8 ± 0.2
B	Civil	Identificación	17 ± 0.2
C	Civil	Altitud	21 ± 0.2
D	Civil	No asignada	25 ± 0.2



Modos de interrogación

El intervalo de tiempo transcurrido entre P1 y P3 determina el modo de interrogación, hay 5 modos de interrogación para fines militares, y otros 4 para fines civiles. [OACI-85].

Cuando la estación SSR separa los pulsos P1 y P3 8 μ seg. (Modo A), el transpondedor responde con el código squawk selectado.

Si la separación entre impulsos interrogadores es de 21 μ seg. el transpondedor responde en Modo C codificando la altitud de la aeronave mediante el código Gillham. La altitud barométrica se obtiene de un altímetro con codificador en los aeronaves convencionales o directamente del Computador de Datos del Aire (ADC) en los aviones con sistema de datos integrados codificándose en ambos casos con una resolución de 100 ft.

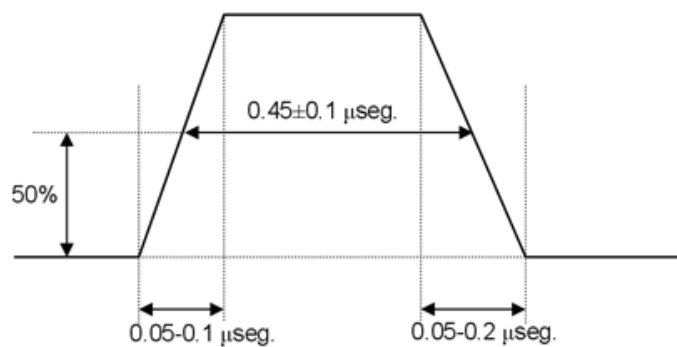
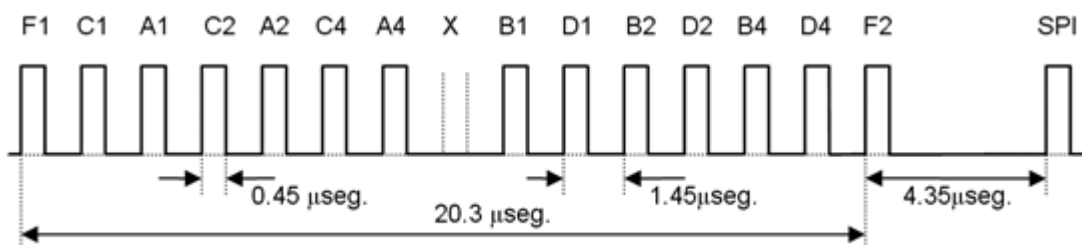
Mediante el pulso P2 se consigue la función SLS (Side Lobe Supression), inhibiéndose el transpondedor de responder a lóbulos laterales.

Modos de interrogación

En ATC se suelen emplear normalmente los modos de funcionamiento 3/A y C, que proporcionan la identificación de la aeronave y los datos de altitud. Las interrogaciones codificadas se transmiten o se suceden de forma “entrelazada” bien por barrido, bien por sector o bien por vuelta de antena.

Por ejemplo: un entrelazado 1:1 entre los modos A y C significa una interrogación modo A por una interrogación modo C; un entrelazado 1:2 entre los mismos modos A y C significa una interrogación en modo A por dos en modo C.

Respuesta



Pulso	Posición (μseg.)
C ₁	1.45
A ₁	2.90
C ₂	4.35
A ₂	5.80
C ₄	7.25
A ₅	8.70
X	10.15
B ₁	11.60
D ₁	13.05
B ₂	14.50
D ₂	15.95
B ₄	17.40
D ₄	18.85

Respuesta Modo A

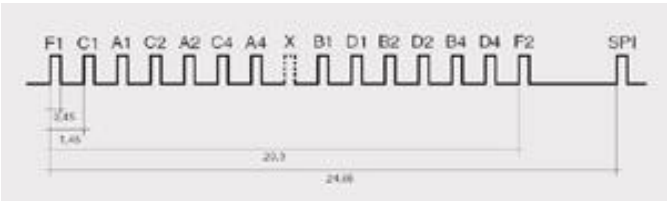
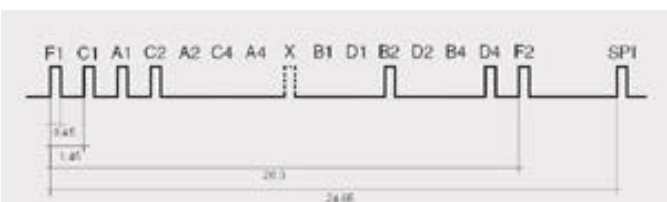
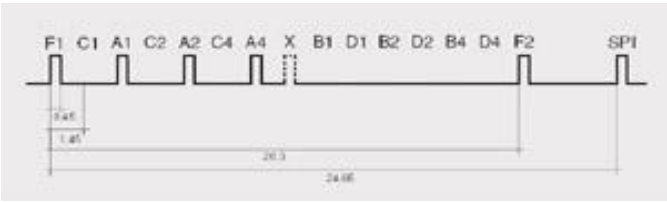
La codificación del indicativo de la aeronave (código A) se realiza en el sistema octal. Para el código A las designaciones o valores a transmitir consisten en cuatro números comprendidos entre 0 y 7 ambos inclusive, utilizándose tres bits para codificar cada uno de estos números.

La codificación se realiza con la secuencia octal ABCD correspondiendo el carácter A al de mayor peso y el D al de menor peso. $A_4A_2A_1B_4B_2B_1C_4C_2C_1D_4D_2D_1$

Mediante este tipo de codificación se obtienen 4096 posibles códigos de identificación de aeronave, de los cuales:

- El código 7700 se utiliza para reconocer una aeronave en estado de emergencia.
- El código 7600 se utiliza para reconocer una aeronave con fallo en el sistema de radiocomunicaciones.
- El código 7500 se utiliza para reconocer una aeronave que sea objeto de interferencia ilícita.
- Los códigos 2000 y 7000 se utilizan para reconocer una aeronave que no haya recibido, de las dependencias de control, instrucciones de accionar el transpondedor, el primero cuando se actúa en vuelo controlado y el segundo para vuelo no controlado.
- El código 7777 se utiliza para transponder fijos y el 7776 para blancos internos de prueba.

Ejemplo respuesta 3/A

Respuesta	A4 A2 A1	B4 B2 B1	C4 C2 C1	D4 D2 D1	Clave
	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	7777
	0 0 1	0 1 0	0 1 1	1 0 0	1234
	1 1 1	0 0 0	0 0 0	0 0 0	7000

Ejemplo de códigos transpondedor (Modo 3/A).

Impulso especial de identificación (SPI)

Cuando existe una ambigüedad en la identificación radar, además de los impulsos de información, se puede transmitir un SPI después del último impulso de referencia, con un espacio respecto a éste de $4,35 \mu\text{seg}$.

Para efectuar la transmisión de un SPI es necesario pulsar momentáneamente (a requerimiento del controlador) el correspondiente interruptor situado en el panel de control del transponder, (marcado como ident.), con ello se consigue duplicar, durante un período de tiempo comprendido entre 15 y 30 seg., el ancho de la señal luminosa que aparece en la pantalla.

El periodo de tiempo durante el cual permanece duplicada dicha señal, está fijado previamente para cada respondedor y figura en sus respectivas órdenes técnicas, el efecto producido en la pantalla radar depende del fabricante.

Respuesta Modo C

La codificación de la altura (código C) se realiza a incrementos de 100 ft, comenzando en el valor -1000 ft y terminando en el valor 126.750 ft, alturas que corresponden a niveles de vuelo -10 y 1267 respectivamente.

En la práctica solo se utilizan los niveles de vuelo redondeados a 10 (FL 100, 110, ..) lo que se traduce en una separación entre aeronaves en altura de 1000 ft.

La codificación C se realiza mediante la secuencia $D_2D_4A_1A_2A_4B_1B_2B_4$ utilizando código Gray (valor que debe ser multiplicado por 500 ft) a la cual se la suma el valor obtenido de ciertas combinaciones (1 a 5) de los bits C multiplicadas por 100 ft y restando por último 1300 ft. (Anexo 10, volumen IV, Apéndice 1 del Capítulo 3).

Limitaciones del SSR

- ❑ **Limitada Capacidad de Enlace de Datos Tierra/Aire:** tan sólo admite 4.096 códigos diferentes de respuestas en el enlace Aire/Tierra, utilizados tanto para identificación como altitud.
- ❑ **Transmisión línea de vista:** lo que produce conos de silencio, falta de cobertura en zonas de baja altitud, ocultación de la antena en la aeronave en determinadas actuaciones y alcance limitado.
- ❑ **Exceso de Señales en el Espacio:** ya que el método utilizado para determinación del azimut obliga a una alta frecuencia de repetición de interrogaciones dando lugar a una alta densidad de señales, aumentando el riesgo de interferencias.
- ❑ **Ausencia de Datos de Actitud:** tales como el rumbo y la velocidad, limitan de forma importante la precisión del seguimiento de pistas (tracking), y la buena operatividad (minimization del número de falsas alarmas), de la función de detección de conflictos a corto plazo.

Algoritmos SSR

- ❑ **Los algoritmos mono-radar:** se utilizan para mejorar la precisión y la disponibilidad de la información SSR.

Para ello se realizan una serie de procesos cuyo resultado es el *alisamiento* de la pista, al objeto de compensar el ruido y, por tanto mejorar la precisión y también el poder disponer de una posición extrapolada, que, además, puede ser presentada al controlador en caso de producirse una falta radar (ausencia de una respuesta).

Estos algoritmos presentan problemas y limitaciones propias, especialmente en maniobras donde se produce una pérdida de precisión de la posición o una mayor incertidumbre con respecto a la misma. La disponibilidad de datos de actitud (rumbo, velocidad, etc.) permitiría superar esta problemática.

Algoritmos SSR

- ❑ **Los algoritmos multiradar:** se utilizan para mejorar la disponibilidad, aunque también permiten mejorar la precisión. Estos algoritmos fusionan la información proveniente de varios radares, o combinan varios algoritmos mono-radar. Permiten superar o minimizar algunas limitaciones, como son las zonas ciegas, conos de silencio y pérdidas en maniobra, al complementarse unos radares con otros.

Sin embargo, el coste para conseguir la cobertura adecuada puede ser en algunos casos muy alto, debido al excesivo número de radares necesarios para cubrir orografías muy accidentadas.

Actualmente, la información de vigilancia no llega directamente al controlador sino que es sometida a un complejo procesamiento y tratamiento a fin de constituir la mejor fuente de información posible. Una de las piezas claves de este procesamiento lo constituye el tracking, donde se genera y predice la trayectoria de una aeronave a partir de bloques de información procedentes de los plots o blancos derivados de una multiplicidad de sensores y fuentes de vigilancia.

Determinación de la posición de los blancos

Tal como se ha explicado, el SSR es un sistema de vigilancia independiente cooperativo, es decir, necesita las respuestas de los blancos para poder realizar su función (cooperativo), pero la información de posición (en 2D, distancia y acimut) se calcula en tierra independientemente del contenido de la respuesta.

La obtención del acimut se logra por la posición angular del eje de la antena en el instante de recibir la respuesta. Para determinar dicho acimut, el sistema de arrastre de la antena genera unas señales denominadas pulso de control de acimut (ACP) y pulso de referencia de acimut (ARP).

La señal de ACP consiste en un tren de 12 ó 14 pulsos, que permiten dividir los 360° en 4.096 y 16.384 sectores por vuelta de antena, respectivamente.

Por tanto, la resolución en acimut será de $0,0878^\circ$ y $0,0219^\circ$, en función de la longitud del tren de pulsos de ACP.

Determinación de la posición de los blancos

La señal ARP consiste en un solo pulso por vuelta de antena, que determina el acimut de referencia de paso por el norte geográfico.

Para el cálculo de la distancia se considera el tiempo que tarda en llegar la respuesta a una interrogación enviada, teniendo en cuenta el tiempo que el transpondedor tarda en decodificar la interrogación y codificar la respuesta, este tiempo está regulado por la OACI.

Para obtener la distancia entre el blanco y la estación radar, se emplea la siguiente expresión:

$$R = (T_{i/v} - T_p) \cdot c_0 / 2$$

En donde:

- R: Distancia entre blanco y estación.
- $T_{i/v}$: Tiempo de ida y vuelta.
- T_p : Tiempo de demora de transpondedor.
- c_0 : Velocidad de la luz.

Ventajas SSR vs. PSR

La principal ventaja del SSR respecto al PSR es permitir obtener información adicional de la aeronave: Identificación, altitud e incluso enlace de datos (modo S).

Otra ventaja del SSR es que los niveles de señal de respuesta recibidos tienen una relación de $1/R^2$ con la distancia, frente a una relación de $1/R^4$ en el PSR.

Esto proporciona las siguientes ventajas operacionales:

- El transmisor funciona con potencias inferiores (es suficiente con potencias de pico del orden del kilovatio); esto implica que el coste del SSR es mucho más reducido.
- El receptor no requiere sensibilidades tan grandes.
- La probabilidad de detección es elevada incluso a grandes distancias, incluso con transmisores de potencia reducida y receptores sencillos.
- Finalmente, otra ventaja radica en que las frecuencias de portadora de interrogación y de respuesta son diferentes, lo que evita la presencia de las señales provenientes de blancos pasivos indeseados. Este aspecto elimina la necesidad de utilizar dispositivos de tipo MTI/MTD (indicador de blanco móvil).

Problemática del SSR

Las limitaciones funcionales del SSR se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Pérdidas de detección de blancos.
- Errores de decodificación de respuestas.
- Efectos multitrayecto.

Pérdidas de detección

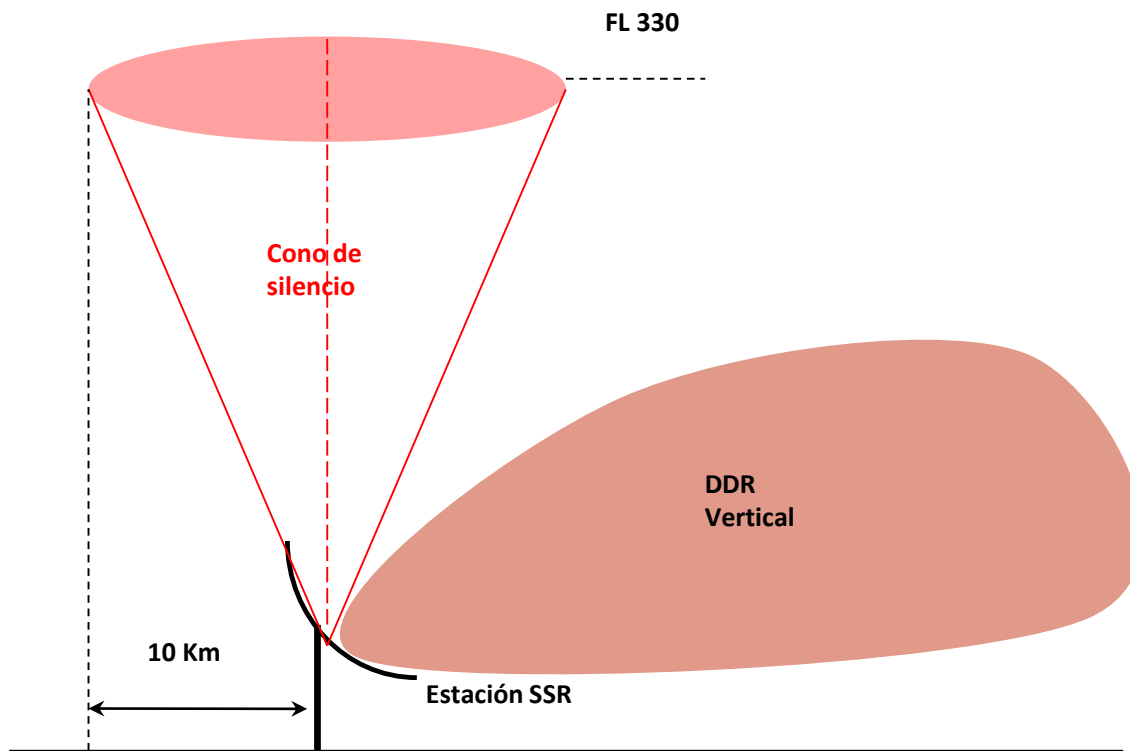
En ocasiones, la estación SSR no recibirá respuestas a las interrogaciones enviadas. Esta falta de respuestas obedecerá a las siguientes causas:

- Ausencia de cobertura.
- Ocultación de antena del transpondedor de la aeronave al realizar maniobras.
- Inhibición de los transpondedores: Cuando los transpondedores responden a una interrogación se desensibilizan durante los $35\mu\text{seg.}$ siguientes a la recepción de una interrogación por lóbulo lateral y durante los $125\mu\text{seg.}$ posteriores a la transmisión de una respuesta; por lo tanto, si durante ese tiempo reciben otra interrogación no habrá respuesta. Trabajando con un PRF elevado es muy probable, que en una zona con varias estaciones SSR en cobertura, las interrogaciones de un determinado radar lleguen cuando su transpondedor está bloqueado por otro SSR y se pierda la respuesta. Es necesario reducir los PRF de los radares, así como optimizar la redundancia de las coberturas radar.

Pérdidas de detección

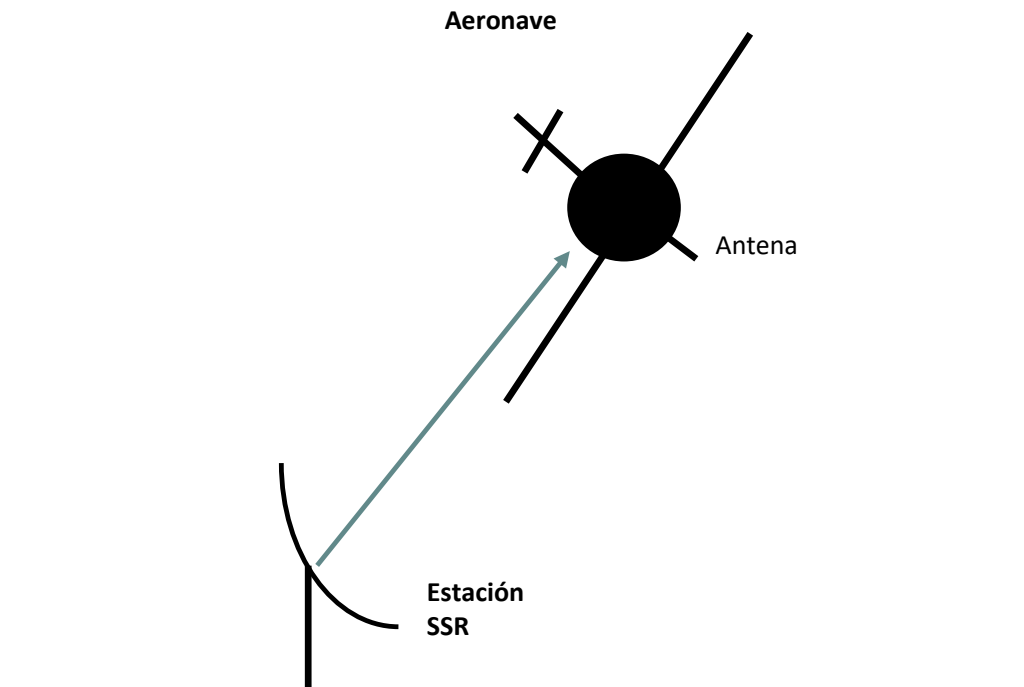
- ❑ **Cono de silencio:** El diagrama de radiación (DDR) vertical de la antena del SSR no radiará entre 30° y 45° de semiángulo en el vértice del cono. Esto determina una falta de cobertura de hasta unos 10 Km desde el emplazamiento a FL330. Para evitar esta pérdida será necesario emplear cobertura múltiple.
- ❑ **Lobulación vertical del DDR de la antena:** Los diagramas de las antenas más antiguas presentaban algunos nulos para diferentes ángulos de elevación, por lo que las aeronaves en esas regiones no recibirían las interrogaciones. El uso de antenas de amplia apertura vertical (LVA) resuelve este problema.
- ❑ **Inclinación de la antena (Tilt):** En algunos casos, por problemas de entorno, resulta necesario inclinar verticalmente la antena dando lugar a posibles pérdidas de detección en alturas muy bajas. Realignar mejor la antena o disminuir su elevación vertical resuelve este problema.

Pérdidas de detección



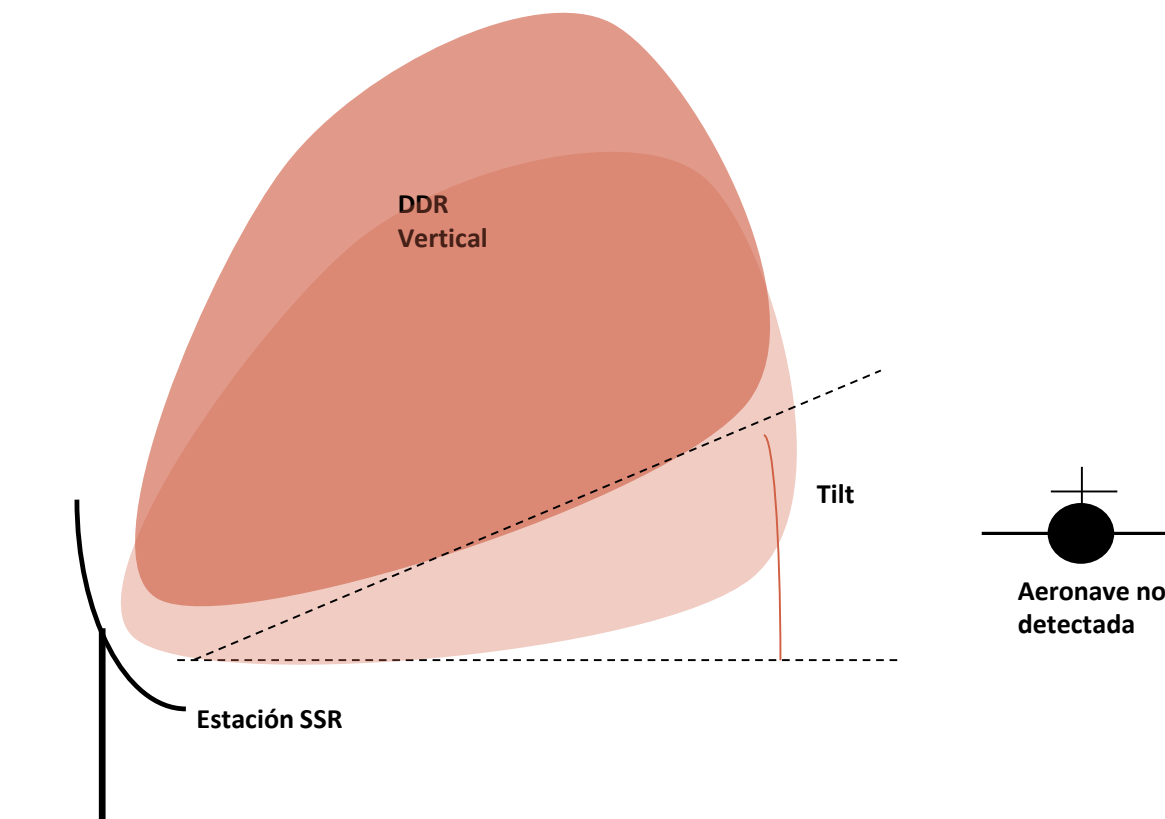
Cono de silencio

Pérdidas de detección



Ocultación temporal de la antena del transpondedor

Pérdidas de detección



Fuera de cobertura por tilt de la antena de la estación SSR

Pérdidas de detección

PROBLEMA	LOCALIZACIÓN	CAUSA	SOLUCIÓN
Ausencia de cobertura en ciertos radiales	Zonas ciegas del radar	Obstáculos en línea de vista	Reubicar la estación en un lugar más elevado
Ausencia de cobertura en distancia	Distancia > 250 NM	Curvatura de la tierra y Potencia	Más estaciones SSR
Ocultación temporal de la antena	Pérdidas de blancos en área de maniobras	Virajes de las aeronaves	Duplicación de antena de transpondedor
Inhibición del transpondedor	Pérdidas de blancos aleatorias	Interrogación de otra estación SSR	Disminuir densidad de SSRs o el PRF de éstas
Cono de silencio	Pérdidas de blancos en la vertical del SSR	DDR vertical de la antena de la estación	Cobertura solapada con otros SSRs
Lobulación vertical	Pérdidas de blancos a ciertos ángulos	Nulos del DDR vertical	Antenas de apertura vertical amplia (LVA)
Pérdidas por tilt de la antena	Pérdidas de blancos a alturas bajas	Falta de radiación a ángulos bajos	Realignar verticalmente la antena

Errores de decodificación de respuestas

Los principales errores de decodificación de respuestas son los siguientes:

- Respuestas a interrogaciones por lóbulos laterales.
- Respuestas de segunda vuelta.
- Respuestas falsas asíncronas (FRUIT).
- Respuestas solapadas (garbling).
- Respuestas partidas (split).
- Coincidencia de los pulsos F1-C2 y F2-SPI.

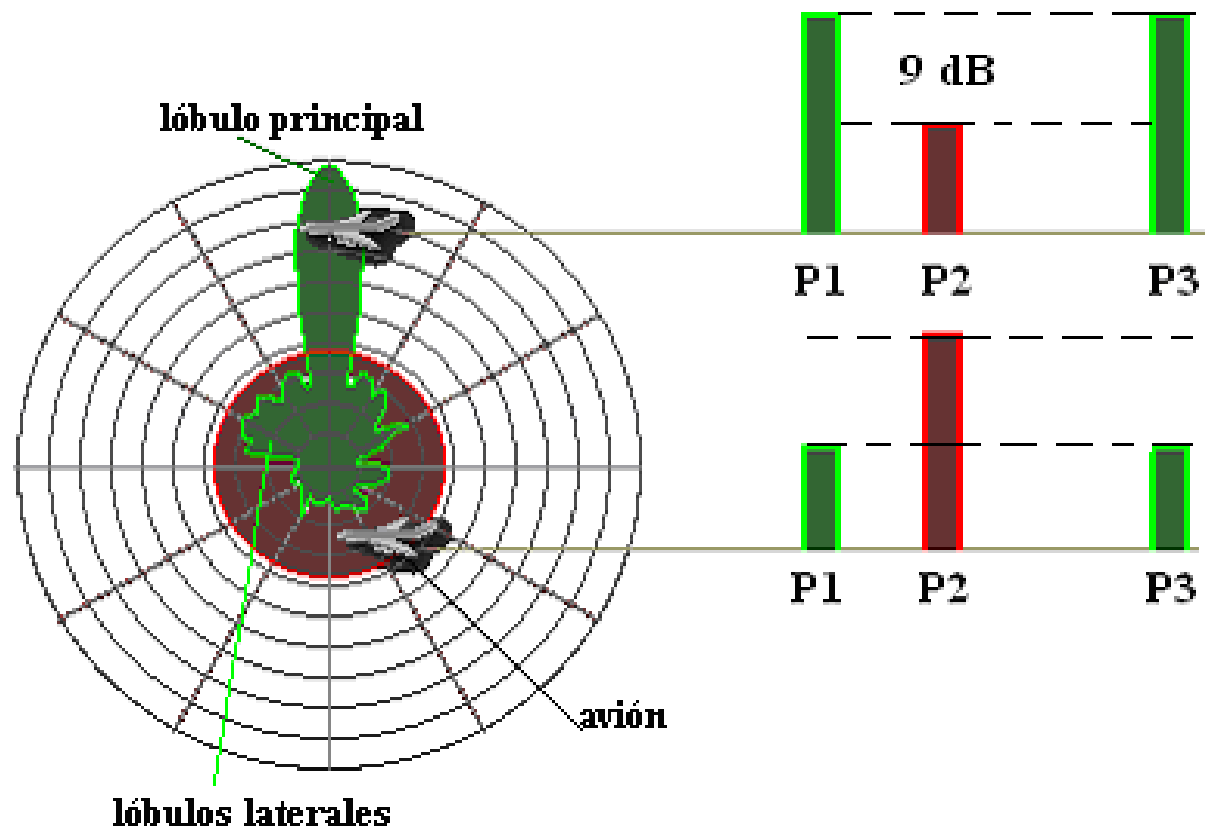
Respuestas por lóbulos laterales

Las interrogaciones de la estación SSR se emiten mediante diagramas de radiación con un lóbulo principal muy directivo en acimut; no obstante, inevitablemente parte de la potencia entregada a la antena se radiará en otras direcciones, por lóbulos laterales del diagrama.

Por este motivo, aunque la potencia emitida por estos lóbulos laterales será considerablemente inferior a la del lóbulo principal, las aeronaves más próximas a la estación podrán detectar las interrogaciones emitidas por los mismos, enviando respuestas. La estación SSR detectará estas respuestas, asignándoles el acimut del lóbulo principal en ese instante.

Este fenómeno será repetitivo, apareciendo en la pantalla radar (PPI) unos segmentos de anillos concéntricos o “ring-around”. Para solucionar este problema se utiliza la supresión de respuestas producidas por interrogaciones procedentes de lóbulos laterales (SLS), consistente en emitir, además de los pulsos P1 y P3, el pulso de control P2, a través de un DDR omnidireccional.

Respuestas por lóbulos laterales



Técnica de supresión interrogaciones por lóbulos laterales

Respuesta de segunda vuelta

Las respuestas de segunda vuelta se producen cuando, encontrándose las aeronaves fuera del alcance máximo no ambiguo, definido por el periodo de repetición de interrogaciones, responden a las interrogaciones de una estación SSR.

Como consecuencia, las respuestas de estas aeronaves llegarán una vez se haya emitido ya una nueva interrogación, confundiendo la estación con una respuesta a ésta emitida por una aeronave más cercana.

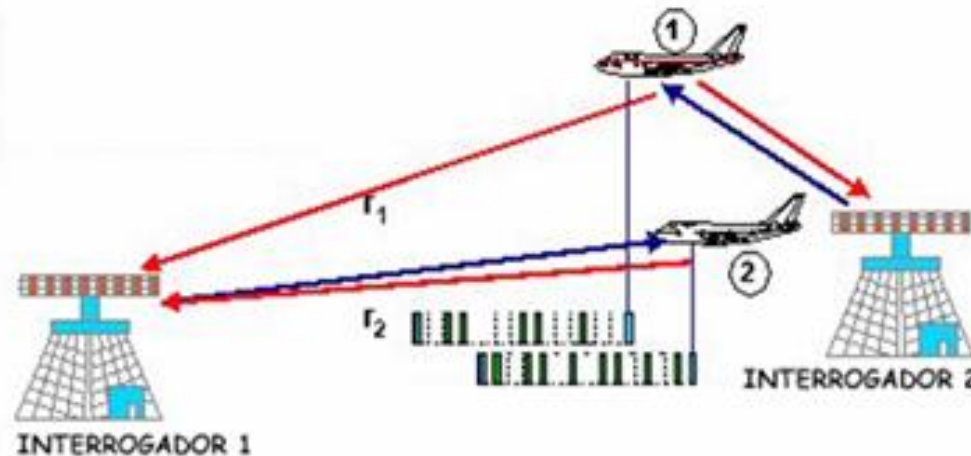
Teniendo en cuenta el entrelazado de modos que suelen usar los SSR, el efecto causado por este fenómeno será la aparición de respuestas con acimut correcto pero distancia incorrecta y con un código A ó C no asignado e incluso absurdo.

Para evitarlo se suele utilizar la técnica stagger, consistente en variar la frecuencia de repetición de pulsos (PRF) entre interrogaciones consecutivas.

De esta forma, las respuestas de segunda vuelta cada vez estarán a una distancia distinta y no así las respuestas de aeronaves ubicadas dentro del alcance máximo no ambiguo.

Fruit

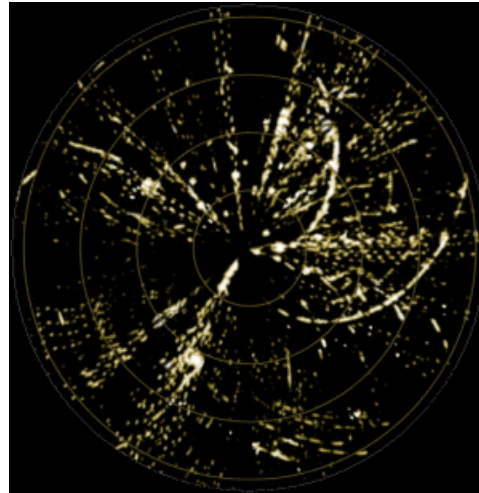
- ❑ **Respuestas a Interrogaciones Ajenas:** La utilización de una única frecuencia, para todas las estaciones, tanto para el haz interrogador, como para el respondedor, puede producir respuestas falsas. Las respuestas falsas (Fruit) recibidas en una estación (1) están generadas por el transpondedor de una aeronave que responde a las interrogaciones de otra estación interrogadora (2). Si el período de repetición de interrogaciones de las estaciones (1) y (2) es diferente, se produce el fruit asíncrono, y si es idéntico el fruit es síncrono.



Fruit

El efecto causado por esta limitación del SSR en la pantalla radar será la aparición de respuestas falsas asíncronas (FRUIT) que tendrán el acimut correcto del blanco, pero no la distancia, dado que no se trata de respuestas a las interrogaciones de la estación.

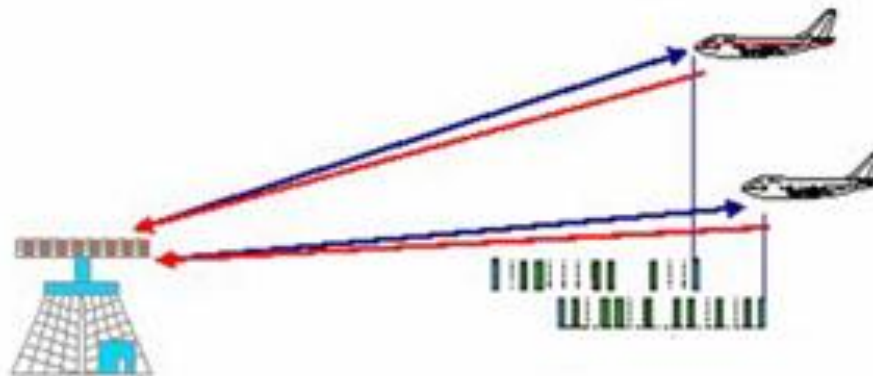
Pantalla PPI con respuestas falsas asíncronas (FRUIT)



El sistema puede eliminar éstas últimas mediante un circuito especial denominado “Defruiter”, que aprovecha el hecho de que sólo las respuestas a interrogaciones de la propia estación estarán situadas a una distancia semejante en exploraciones sucesivas, mientras que las respuestas falsas asíncronas no conservarán la distancia.

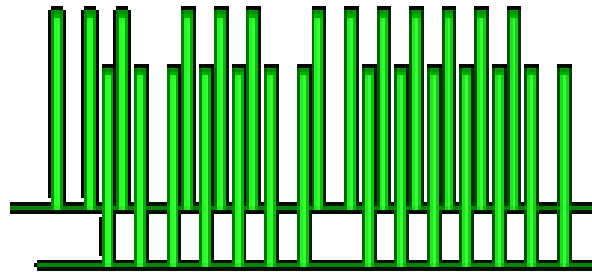
Garbling

- ❑ **Solape de Respuestas:** Los solapamientos (Garbling) son consecuencia de la proximidad entre aeronaves. Si dos aeronaves se encuentran separadas radialmente menos de 3 Km, se produce el solapamiento de dos respuestas en el receptor de la estación terrestre. Cuando se solapan los pulsos de dos respuestas se puede producir la detección de un blanco con código incorrecto o directamente puede que no sea posible su decodificación.



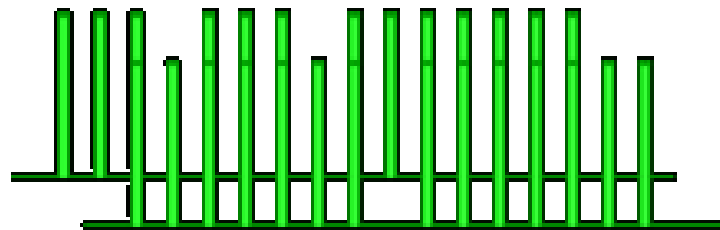
Garbling

En el Garbling asíncrono las respuestas llegan solapadas pero sus pulsos no se superponen. Se pueden detectar de forma separada en el procesador de respuestas.



Garbling Asíncrono

En cambio, el fenómeno de Garbling síncrono tiene lugar cuando los pulsos sí se superponen, por lo que no se pueden decodificar las respuestas.



Garbling Síncrono

Respuestas Partidas (split)

Al trabajar con PRF elevados, también puede ocurrir el efecto split o partición de blancos. La partición de respuestas es consecuencia del criterio de validación de blancos utilizado en la técnica de ventana deslizante es decir, el número mínimo de respuestas, sobre el de interrogaciones, necesarias para validar un blanco.

El efecto producido consiste en la aparición de dos blancos muy próximos con el mismo código.

La solución al problema es la utilización de la técnica monopulso para la determinación del acimut.

La siguiente tabla resume los problemas mencionados, la causa de los mismos y las posibles medidas para solucionarlos.

Errores de decodificación

PROBLEMA	LOCALIZACIÓN	CAUSA	SOLUCIÓN
Respuestas por lóbulos laterales	Distancia < 27 NM "Ring around"	Interrogación y recepción por lóbulos laterales	SLS (pulso P2)
Respuestas de segunda vuelta	Blancos próximos con códigos y altitudes extrañas	Alcance por potencia mayor que alcance no ambiguo	Disminuir PRF y Stagger
Respuestas falsas (FRUIT)	Blancos con distancia errónea y acimut correcto	Aeronaves en zonas cubiertas por otros SSR	PRFs diferentes en cada estación
Respuestas solapadas (garbling)	Respuestas indistinguibles o códigos incorrectos	Solapamiento en la llegada de varias respuestas	Extrapolación de plots con algoritmos de tracking
Coincidencia F1-C2/F2-SPI	Blancos fantasmas	Tiempo entre F1-F2 igual tiempo C2-SPI	Lógica de extracción de respuestas
Respuestas partidas (split)	Blancos próximos con igual código	Ventana deslizante: criterio de validación de blancos	Cambiar criterio de validación de blancos

Efectos multitrayecto

El término multitrayecto describe el fenómeno que se produce cuando, debido a la presencia de un obstáculo, las interrogaciones o respuestas no llegan sólo por el camino directo (línea de vista) sino también por un camino más largo causado por la reflexión de la señal en el citado obstáculo.

Considerando que las interferencias (las señales reflejadas) pueden presentarse separadas, en el tiempo y acimut respecto a la señal deseada, los efectos de las mismas pueden ser muy variados.

Las reflexiones pueden clasificarse en dos grupos:

- Respuestas a reflexiones recibidas por lóbulos secundarios (reflexiones en acimut).
- Respuestas a reflexiones recibidas por lóbulo principal (reflexiones en distancia).

Efectos multitrayecto

Las respuestas a reflexiones recibidas por lóbulos secundarios originan, además del blanco principal, otro falso que se distingue del real por lo siguiente:

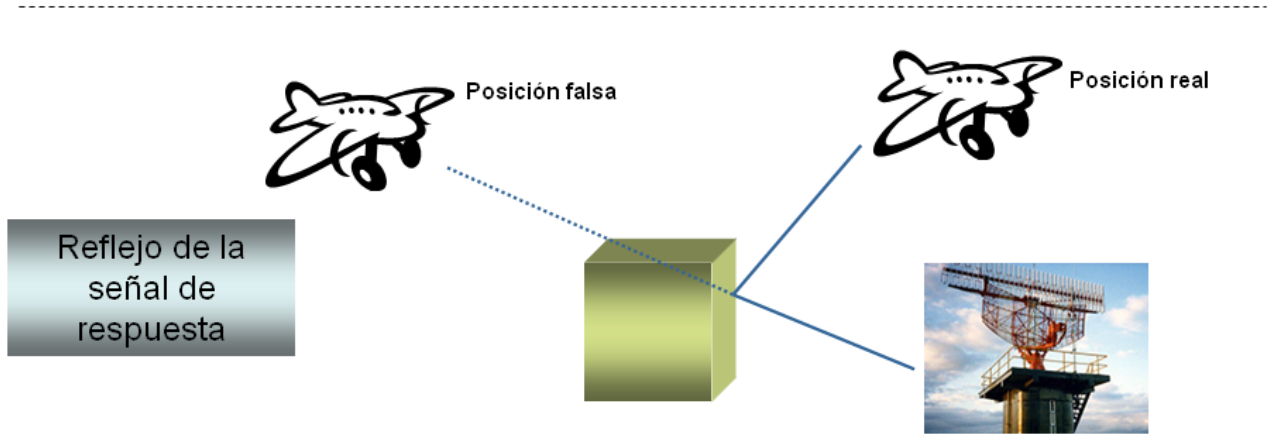
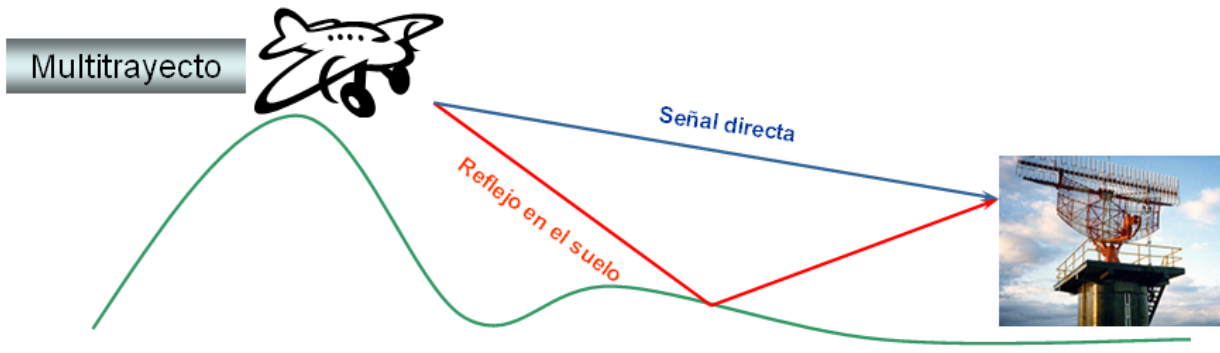
- El blanco falso está a mayor distancia que el real.
- El acimut del blanco falso corresponde al acimut del elemento reflector.
- El código y altura de los dos blancos son idénticos.

Las respuestas a reflexiones por lóbulo principal, originan un blanco falso, situado sobre el mismo acimut que el real, pero más alejado de la estación.

Todos estos multitrayectos provocan lo siguiente:

- Errores de puntería.
- Pérdidas de códigos.
- Pérdidas de respuestas.
- Pérdidas de blancos.

Efectos multitrayecto

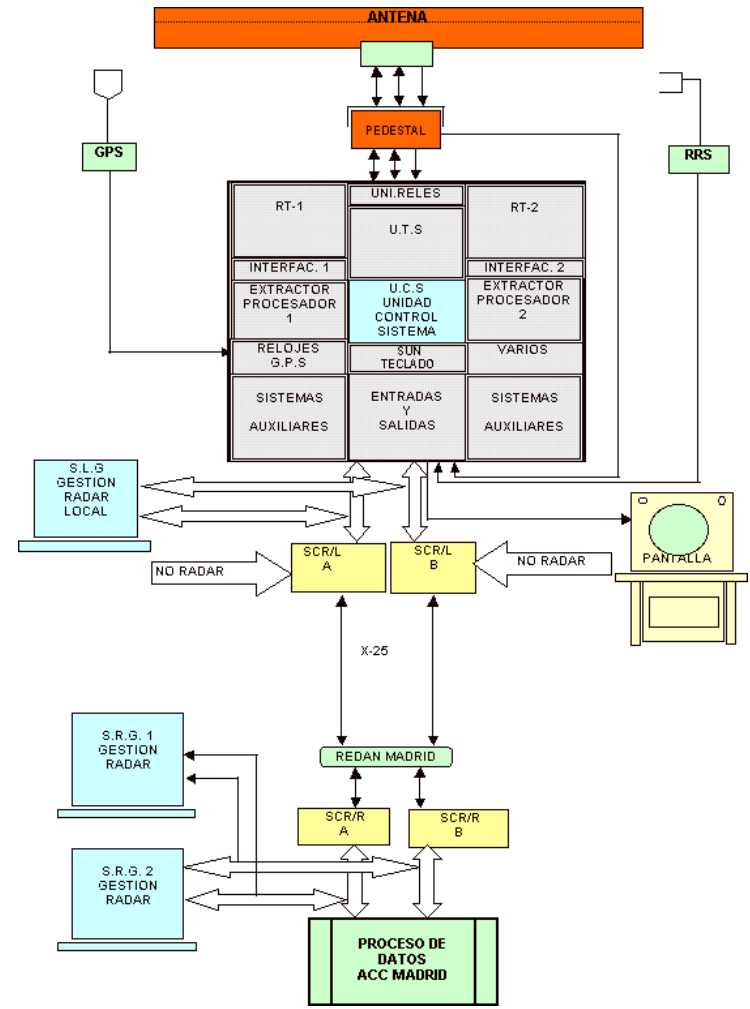


Reflejos y Multitrayecto

Efectos multitrayecto

PROBLEMA	LOCALIZACIÓN	CAUSA	SOLUCIÓN
Reflexiones en distancia (por lóbulo principal)	Blanco falso en mismo acimut y a mayor distancia que el real	Reflexiones en plano vertical (terreno)	DDR con poca señal a ángulos bajos (antenas LVA) o elevar la antena y rodear con árboles
Reflexiones en acimut (por lóbulos laterales)	Blanco falso a mayor distancia y distinto acimut	Reflectores en entorno de la estación	Apantallamiento, técnicas electrónicas (IISLS, RSLs, TST...)

Diagrama de bloques



Antena

La antena se utiliza para radiar pulsos de interrogación y recibir pulsos de respuesta del blanco interrogado.

Esta puede ser del tipo parabólica (utilizada normalmente en el SSR convencional), o de apertura sintética (utilizada en radares que tengan que conformar su diagrama de radiación).

Las antenas de apertura sintética contienen en su frontal un array de dipolos, dispuestos en posición vertical.

Modificando las fases y potencias con que se alimenta el array de dipolos se consiguen diferentes diagramas de radiación.

Dependiendo del tipo de radar secundario, convencional (SSR) o monopulso (MSSR) la antena puede generar dos o tres diagramas de radiación.

- SUMA, generado en el SSR y MSSR.
- DIFERENCIA, únicamente generado en el MSSR.
- OMNIDIRECCIONAL, generado en el SSR y MSSR.

Antena

Los canales suma y diferencia se ajustan en fase para el correcto funcionamiento de la función monopulso.

En la parte posterior de las antenas de apertura sintética se colocan una serie de columnas de dipolos que contribuyen a conseguir el diagrama omnidireccional.

Los elementos de RF que componen la antena están cableados a través de una matriz de distribución, la cual entrega la energía de RF con las amplitudes y fases adecuadas para lograr los diagramas de radiación deseados.

Cada uno de los canales tiene la siguiente función:

- Por el canal suma se transmiten los pulsos de interrogación P1 y P3 y se recibe la respuesta emitida por el transpondedor.
- Por canal omnidireccional se transporte el pulso P2 necesario para la función SLS. En recepción se utiliza también este canal para la función RSLs, realizando una comparación entre las señales del diagrama suma y el omnidireccional.
- El canal diferencia se utiliza solo en recepción en la función monopulso.

Antena



Antena de apertura sintética que utiliza el radar monopulso IRS-20

Pedestal

En el pedestal se encuentra el sistema de arrastre que soporta y proporciona movimiento de giro a la antena a una velocidad constante los 360º de acimut.

En del pedestal se podemos tenemos los siguientes elementos:

- Motor.
- Caja reductora.
- Control y variador de velocidad.
- Junta rotatoria.
- Codificadores (encoders).

El motor es trifásico y su velocidad se controla a través del variador de velocidad. Este variador modifica la frecuencia de la señal trifásica para conseguir una determinada velocidad angula en el eje de la antena. El motor está conectado a una caja reductora cuyo eje está acoplado a la mesa giratoria sobre la que está anclada la antena.

Pedestal

Los codificadores o encoders, proporcionan información de la posición angular de la antena mediante 4096 ó 16384 pulsos por vuelta de antena llamados ACP (acimut change pulse).

Cada vez que el haz principal de la antena apunta al norte geográfico se genera un nuevo pulso denominado ARP (acimut reference pulse).

Para conectar las señales de RF a la antena se emplea una junta rotatoria de tres canales desde la parte fija a la parte móvil del sistema de arrastre.

Los anillos deslizantes, se utilizan para alimentar otros componentes eléctricos como las balizas o transportar energía eléctrica.

Transmisor/Receptor

En el transmisor la señal de oscilador local de 1030 MHz. Modulada por la señal de interrogación se amplifica, después de este proceso se envía a la antena a través de un módulo de conmutación.

El módulo de conmutación envía los pulsos P1 y P3 a la antena suma y el pulso P2 a la omnidireccional.

En el receptor a las respuestas recibidas por los tres canales en 1090 MHz. se les realiza una conversión de frecuencia, obteniéndose una frecuencia intermedia de 60 MHz., para ello se utiliza la señal del mismo oscilador local que el transmisor.

Las respuestas que llegan por los canales suma, omnidireccionales y diferencia, son detectadas y amplificadas logarítmicamente, obteniéndose las señales de video que se llevan a los extractores para su tratamiento.

La amplificación se realiza de forma logarítmica debido a que el rango dinámico, (diferencia entre la señal de mayor y menor potencia), es muy alto, de esta forma se consigue amplificar con un factor más elevado las señales de menor potencia.

Extractor/Procesador

El extractor tiene dos funciones principales:

- a) Sincronización de los elementos e interrogación.
- b) Detección y tratamiento de blancos.

Con la primera función se realiza la sincronización con la antena, otros extractores y otros dispositivos, además se generan las señales que controlan los tiempos de transmisión y recepción, y las señales de interrogación.

En la detección y tratamiento de blancos, la información recibida debe ser procesada para extraer las respuestas de entre toda la información presente a la salida del procesador de video.

Las respuestas detectadas sufren un procesamiento adicional hasta convertirse en “plots”, es decir, información que incluye la posición del blanco, calidad del mismo, altitud y código de identificación del avión, etc.

Extractor/Procesador

La detección de respuestas se basa en la existencia de los pulsos F1 y F2 de encuadramiento, que forman parte del formato de respuesta.

Para ello deberán existir “blancos de video” separados $20.3 \mu\text{seg}$. Cuando esto sucede, se genera un pulso denominado “video bracket”.

En este caso deben capturarse todos los pulsos de video comprendidos entre los mencionados pulsos F1 y F2, y asociarles la cuenta de distancia y de acimut.

Para validar una respuesta, además del proceso de filtrado anterior, se debe esperar a que en exploraciones sucesivas se vuelva a repetir, a la misma distancia y con el mismo “video bracket”.

A esta técnica de validación de respuesta utilizada en el SSR convencional se la denomina “ventana deslizante”.

Técnica de ventana deslizante

La información suministrada por el procesador de vídeo puede ser representada por una matriz, en la que los "0" representan la ausencia de vídeo y los "1" su presencia. En dicha matriz cada fila se corresponde con un barrido, ó exploración, originada por una interrogación. Por su parte, cada columna representa una distancia.

De esta forma, un giro completo de la antena estará representado por una matriz binaria de tamaño:

$$s = m.n = 4\pi . R_{max} . F_r / c . \tau . \Omega$$