Departamento de Ingeniería de Comunicaciones

Sistemas y Servicios de Transmisión por Radio

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

SISTEMAS RADAR

- Diagrama de bloques básico y clasificación
- Balance de potencias: medida de distancias
- Proceso de detección radar
- Sección radar recta
- Sistema radar de onda continua: medida velocidades
- Sistema indicador de blancos móviles
- Sistema radar de seguimiento: medida de posiciones
- Sistema radar de apertura sintética

SISTEMAS DE RADIONAVEGACIÓN

- Sistemas hiperbólicos: Decca, Loran y Omega
- Sistemas de navegación por satélite

Definición de sistema radar

- Armada USA
  - *radio detection and ranging*
- Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)
  - *sistema de radiodeterminación basado en la comparación entre señales radioeléctricas **reflejadas** o **retransmitidas** desde la posición a determinar*

Aplicaciones

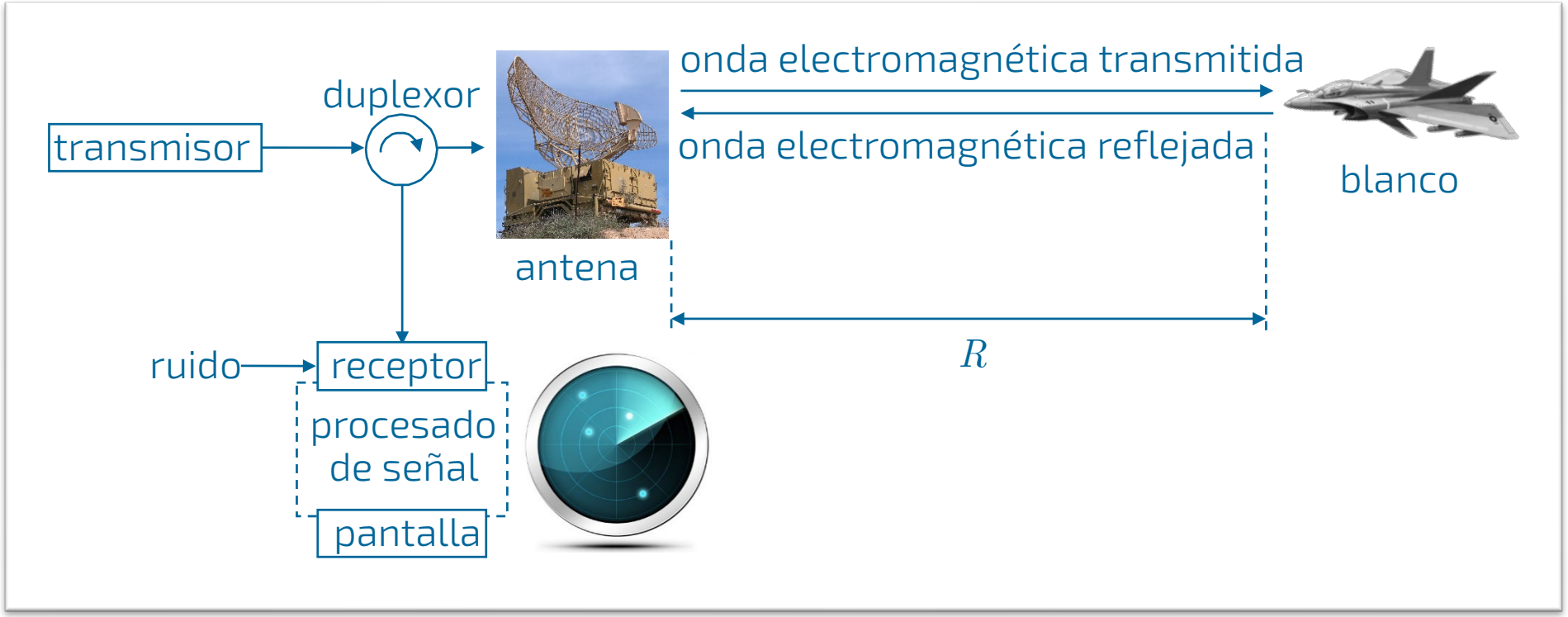
- Control aéreo (ATC / Air Traffic Control): control del tráfico en ruta y en la proximidad de aeropuertos, ayuda al aterrizaje, ...
- Navegación aérea: radar meteorológico para evitar zonas con condiciones meteorológicas adversas, altímetros, ...
- Navegación marítima (VTS): radar de a bordo para evitar colisiones (poca visibilidad), radar de costa para seguimiento, vigilancia y ayuda (en puertos), ...
- Aplicaciones espaciales: seguimiento y control de satélites, ayuda a los alunizajes
- Medioambientales: clima, búsqueda de recursos naturales, protección de bosques, control de contaminación, ...
- Aplicaciones militares: control y guiado de misiles, contramedidas electrónicas (ECM), EECM, ...

Frecuencias utilizadas

- HF (3 – 30 MHz): Vigilancia OTH (over–the–horizon)
- VHF (30 – 300 MHz): Vigilancia a distancias muy elevadas
- UHF (300 – 1000 MHz): Vigilancia a distancias muy elevadas
- L (1 – 2 GHz): Vigilancia a distancias elevadas. Control de tráfico en ruta
- S (2 – 4 GHz): Vigilancia a distancias intermedias. Control de tráfico en terminales. Condiciones meteorológicas a largas distancias
- C (4 – 8 GHz): Seguimiento a distancias elevadas
- X (9 – 12 GHz): Seguimiento a distancias cortas. Control de misiles. Aplicaciones cartográficas
- K_u (12 – 18 GHz): Cartografía de elevada resolución. Altura de satélites
- K (18 – 27 GHz): Poco uso (vapor de agua)
- K_a (27 – 40 GHz): Vigilancia de aeropuertos. Cartografía de muy alta resolución

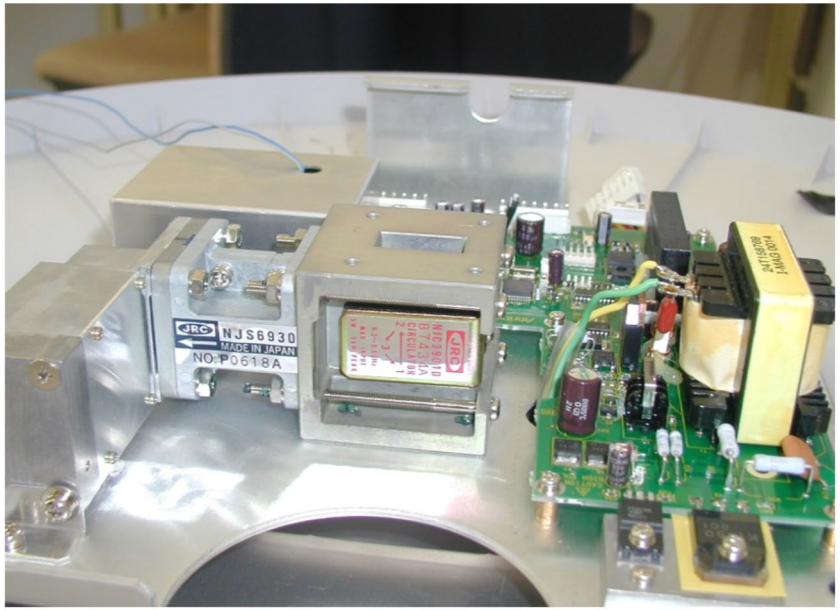
Esquema básico de funcionamiento

- Bloque transmisor
- Bloque de antena
- Bloque receptor
- Bloque de visualización



Bloque de transmisor (I)

- Radar marítimo sencillo:
  - Alimentado con baterías de 12/24 voltios
  - Potencia de pico de salida.– 4 kW (±20–50%)
  - Frecuencia.– 9410±30 MHz
  - Señal pulsada.– ancho y frecuencia de repetición de pulsos



Bloque de transmisor (II)

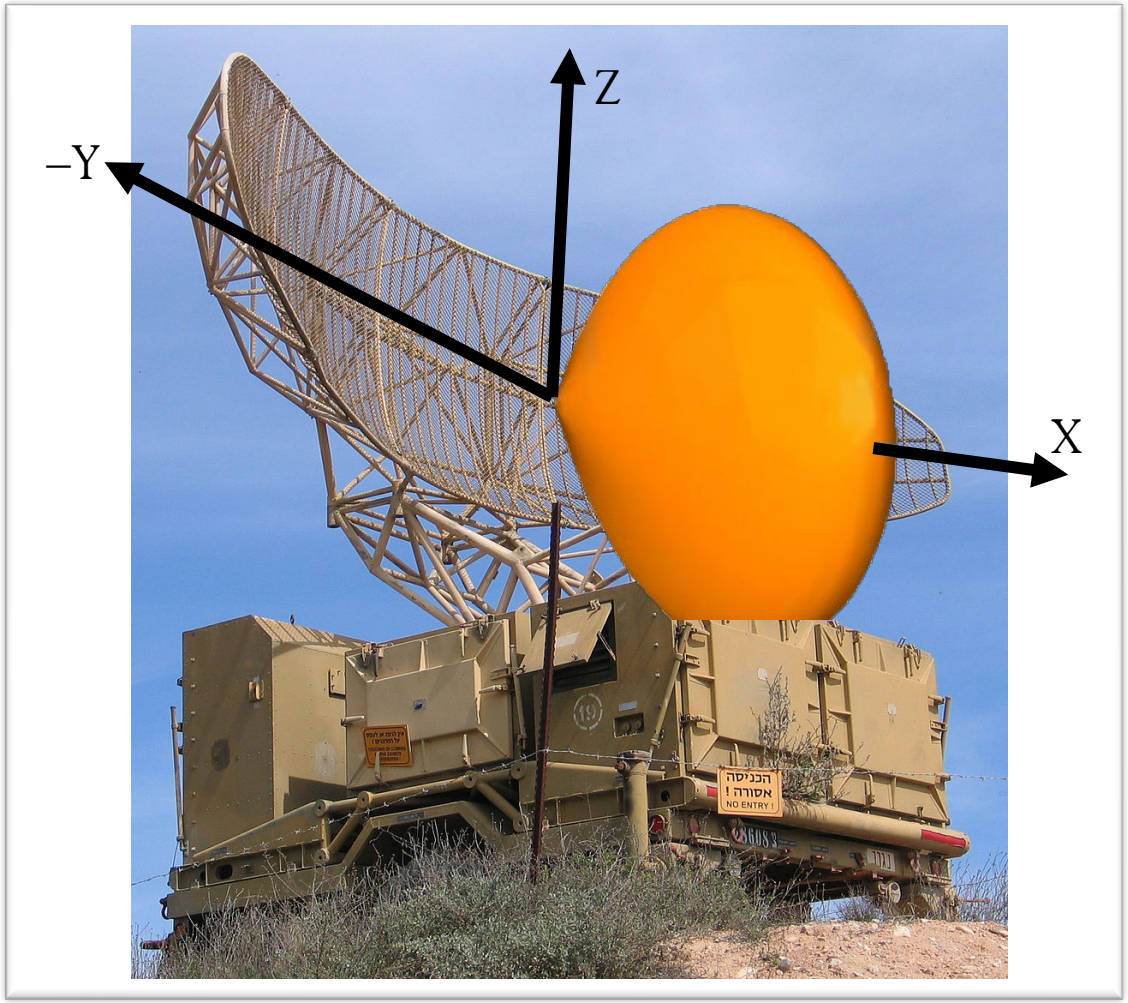
- Radar marítimo sencillo (continuación):
  - Selección automática del ancho de pulso
    - desde 0.125 hasta 0.25 NM: τ = 0.08 μs
    - desde 12 hasta 36 NM: τ = 0.8 μs
  - Frecuencias de repetición de pulsos
    - τ = 0.80 μs $\rightarrow f_{rp}$ = 600 Hz (aproximadamente)
    - τ = 0.25 μs $\rightarrow f_{rp}$ = 1500 Hz
    - τ = 0.08 μs $\rightarrow f_{rp}$ = 2000 Hz

Bloque de antena (I)

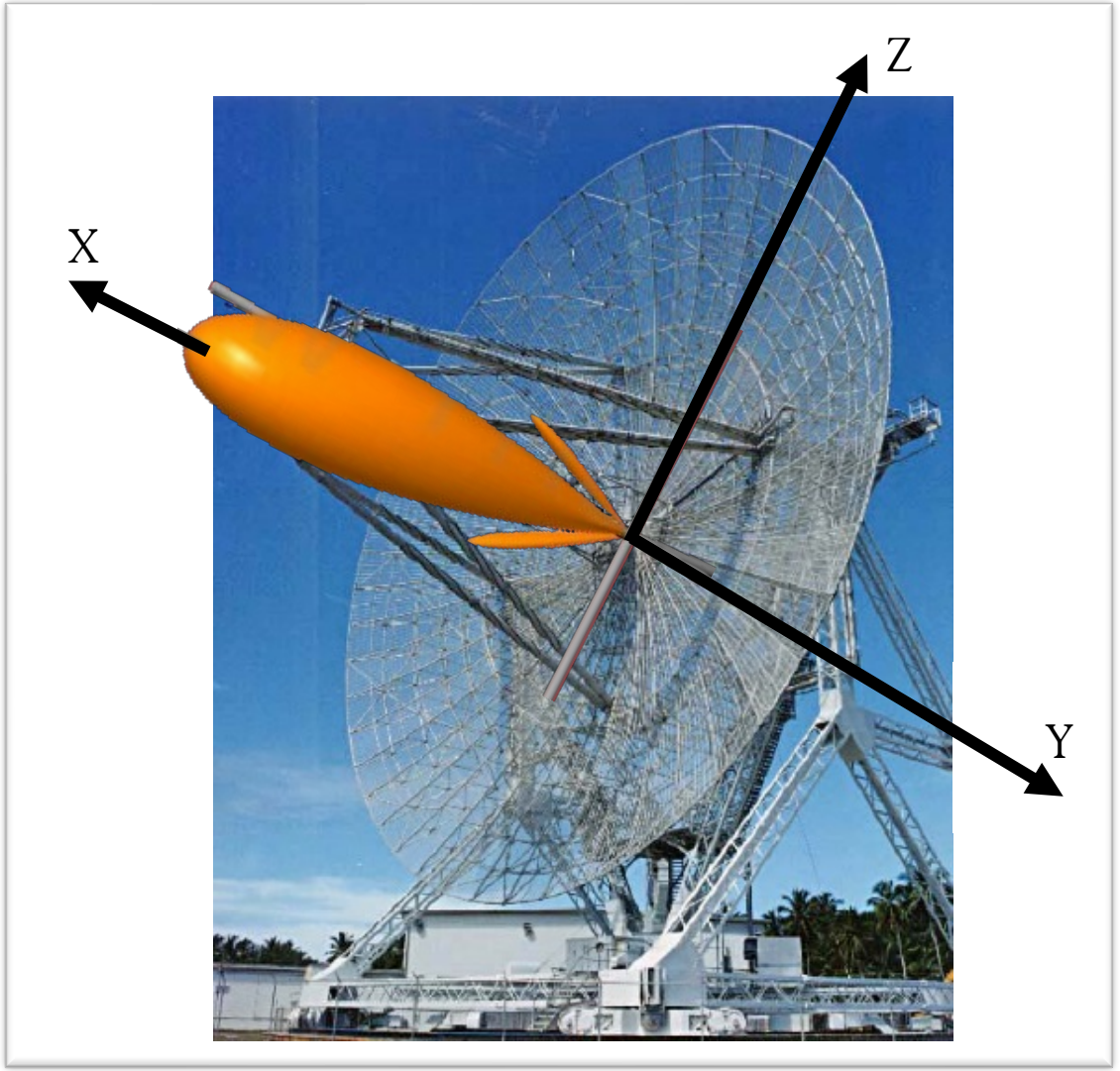
- Definición de antena:
  - IEEE: Medio para radiar o recibir ondas de radio
  - Transductor medio guiado-espacio libre
- Misión: radiar la potencia suministrada o capturar la incidente con las características de direccionalidad y polarización impuestas
- Ganancia de una antena:
  - Para antenas muy directivas (anchos de haz a 3 dB θ_H y θ_V muy pequeños, 5-10 grados)

$$G = \frac{4\pi}{\theta_H \theta_V}$$

Bloque de antena (II)



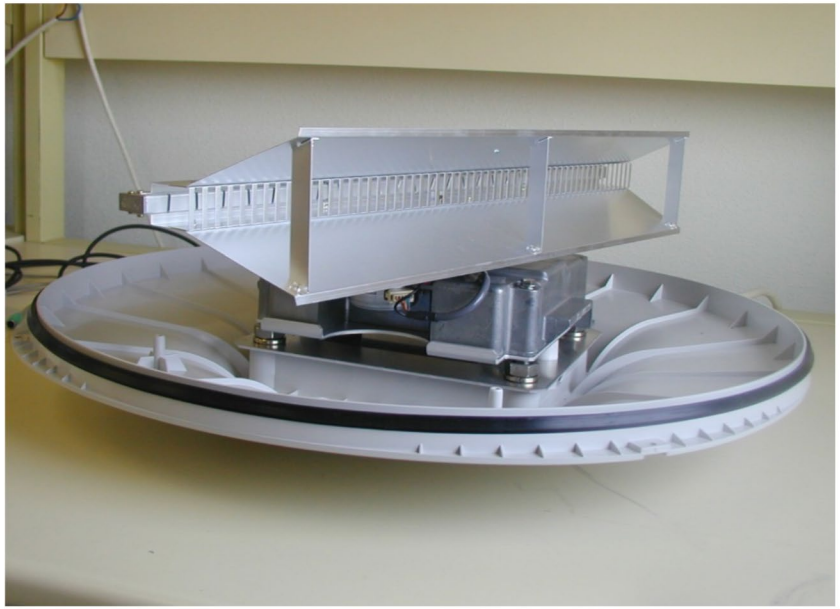
Barrido dos dimensiones



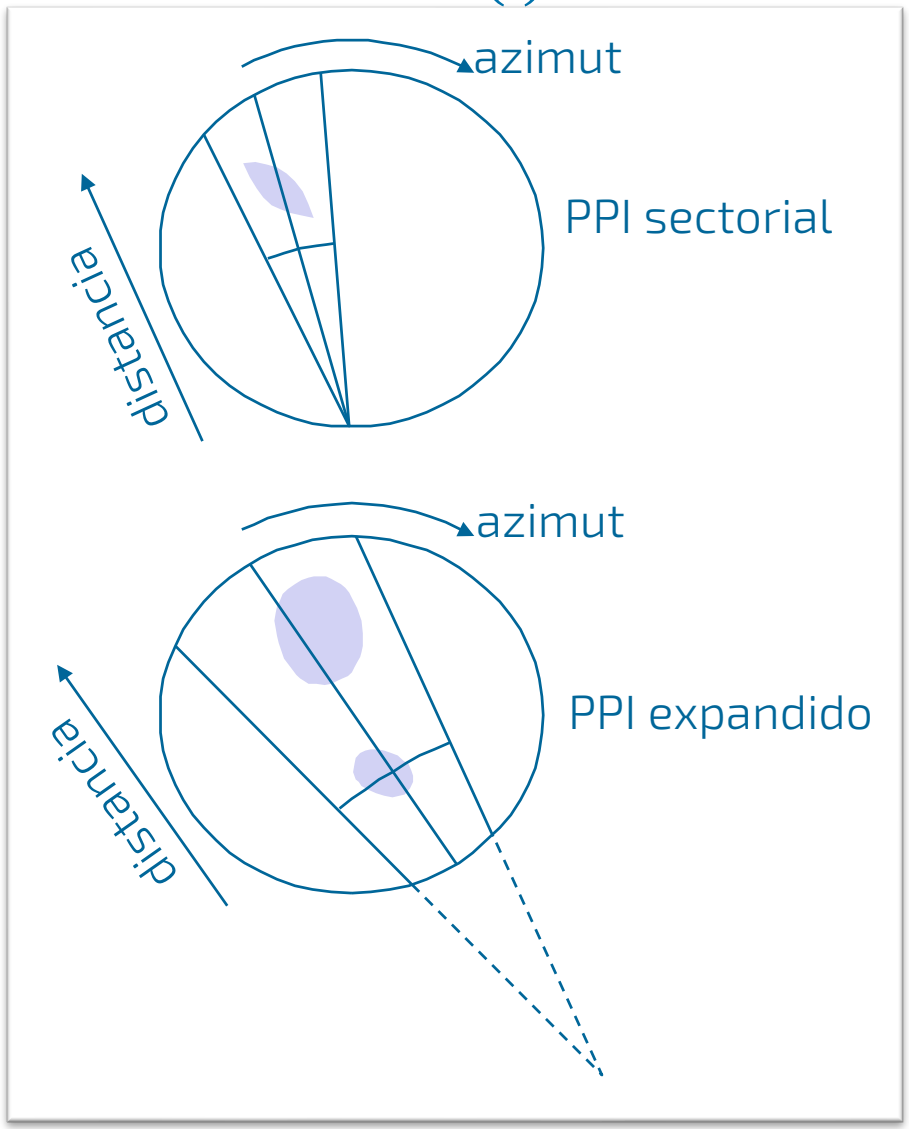
Barrido tres dimensiones

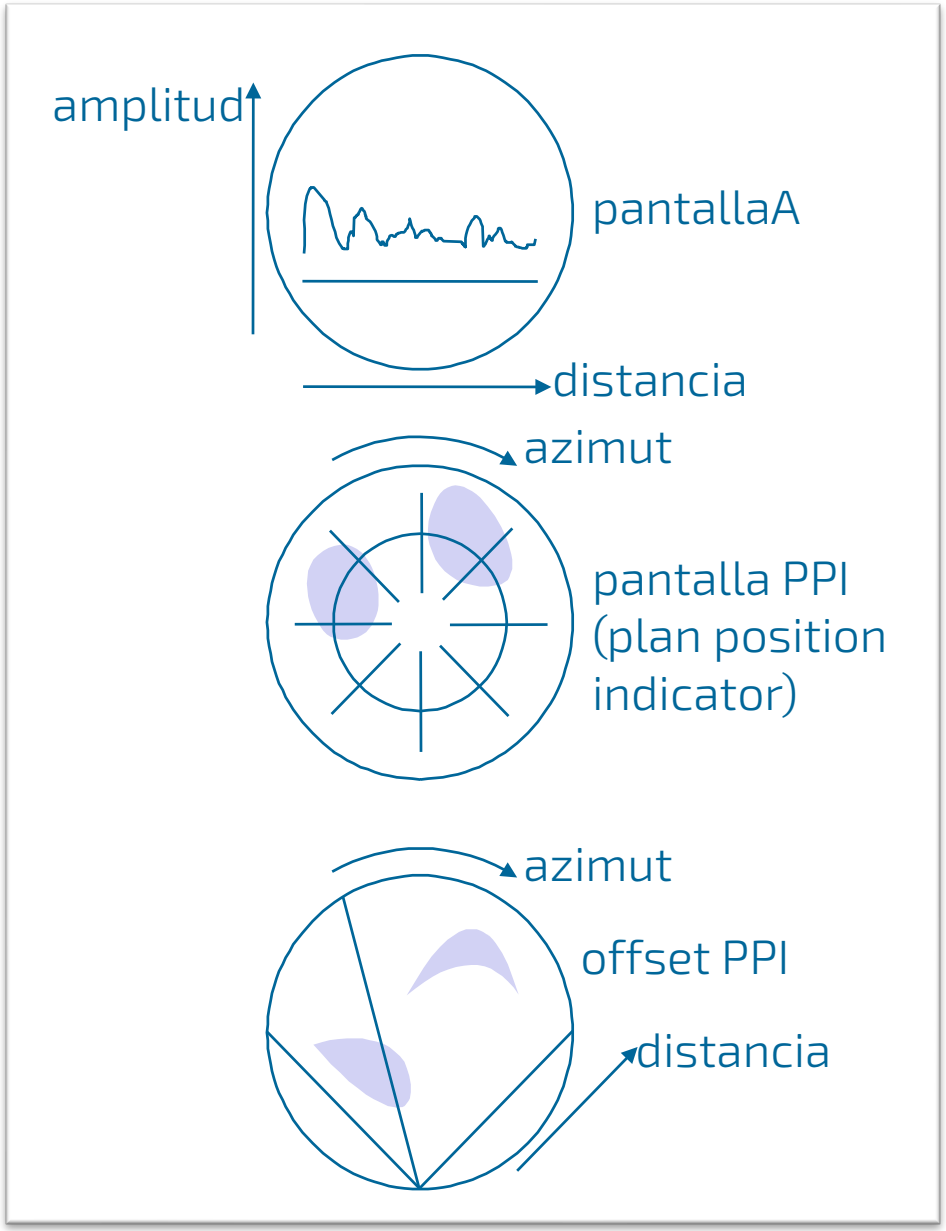
Bloque de antena (III)

- Radar marítimo sencillo:
  - Velocidad de giro.– 24 rpm (±20%)
  - Frecuencia.– 9410±30 MHz
  - Tipo de antena.– Línea ranurada
  - Diagrama de radiación.– 3.9° en azimut y 25° en elevación

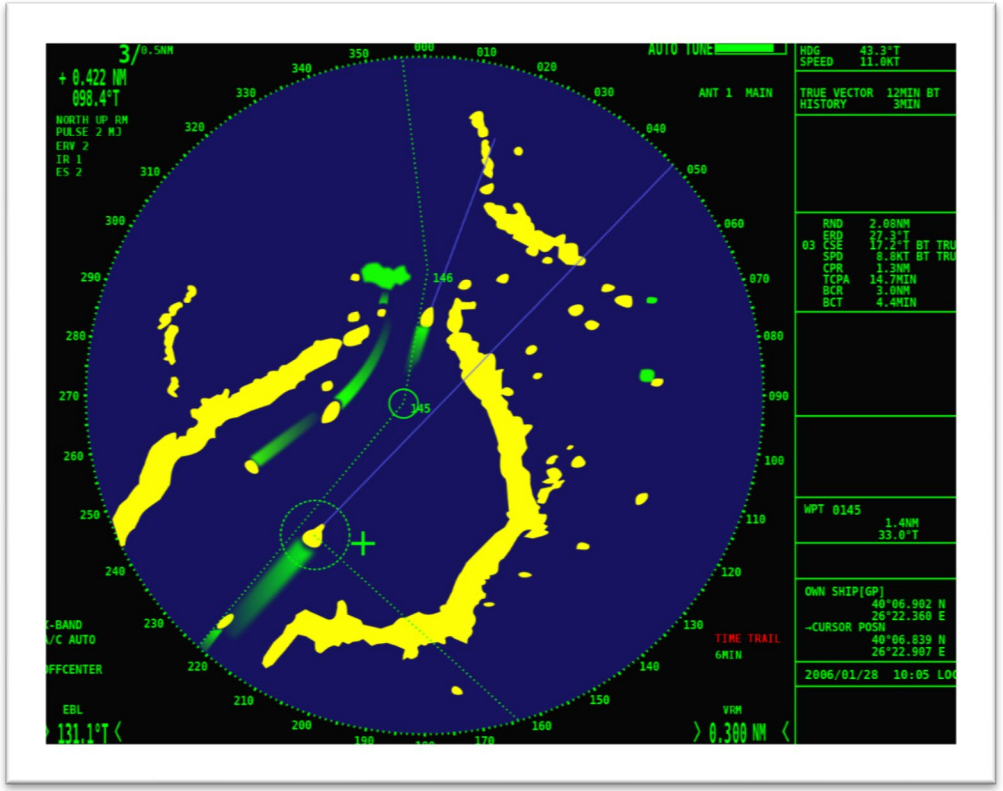


Bloque de visualización (I)

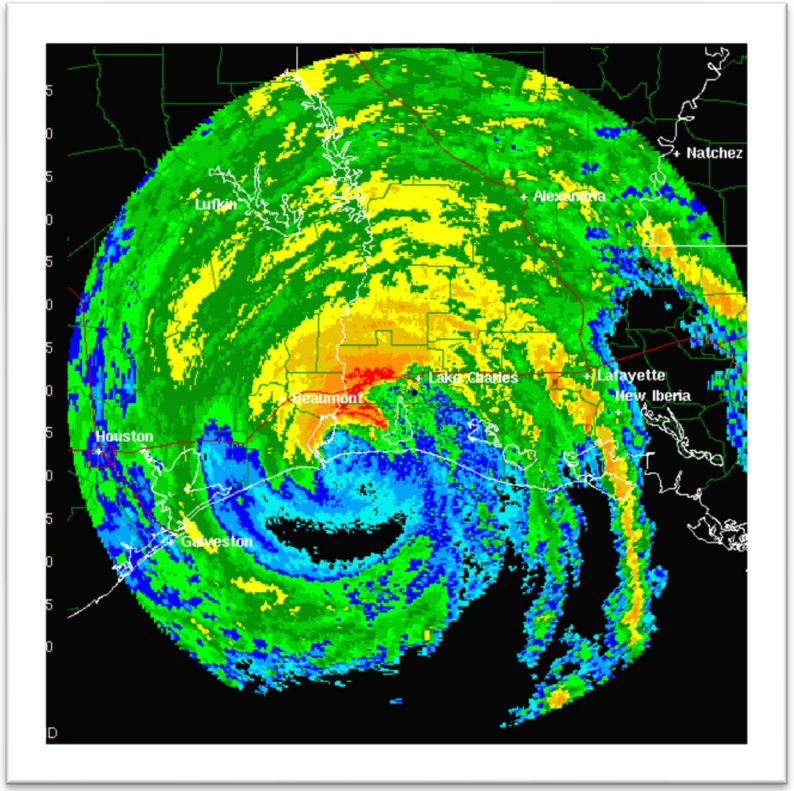




Bloque de visualización (II)



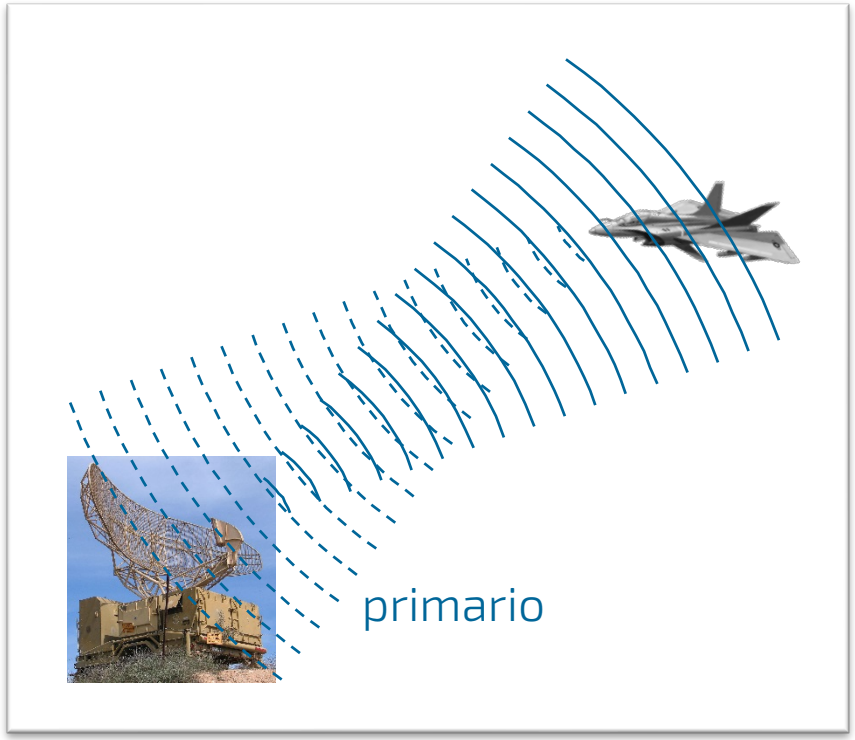
Localización y seguimiento

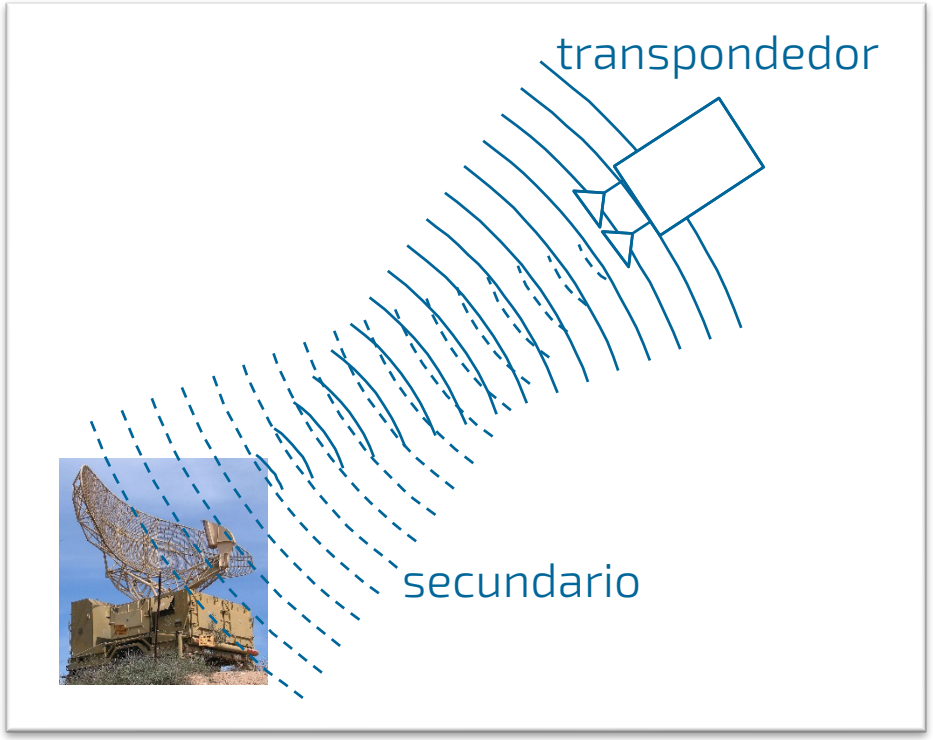


Meteorológico

Clasificación (I)

- Según el blanco: primario o secundario

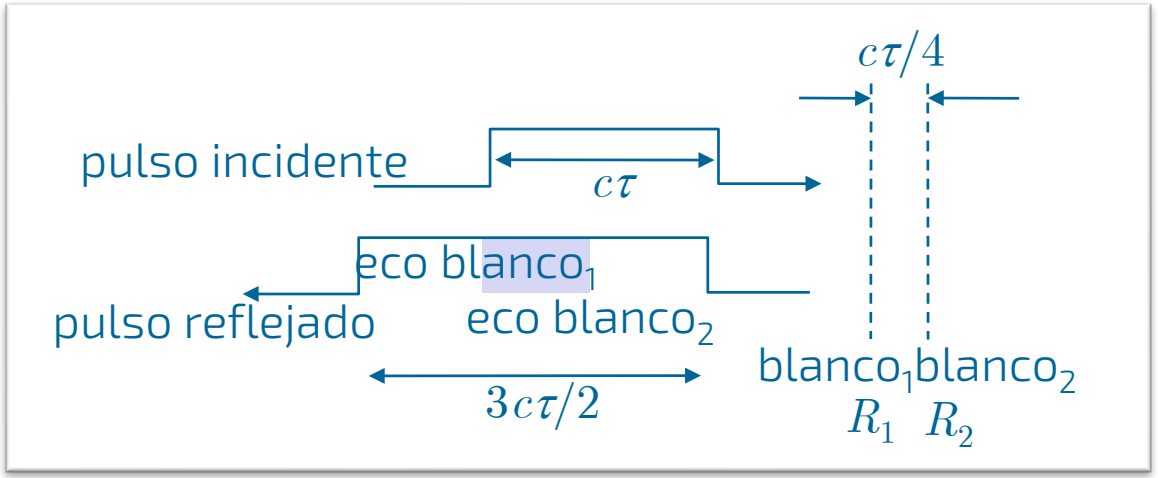


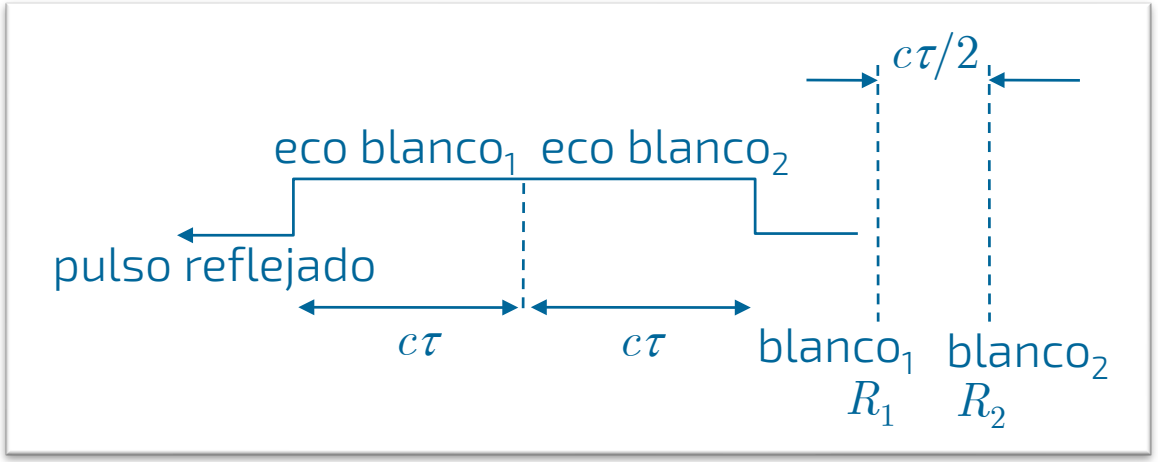


- Según la posición del transmisor y del receptor: monoestático o biestático

Clasificación (II)

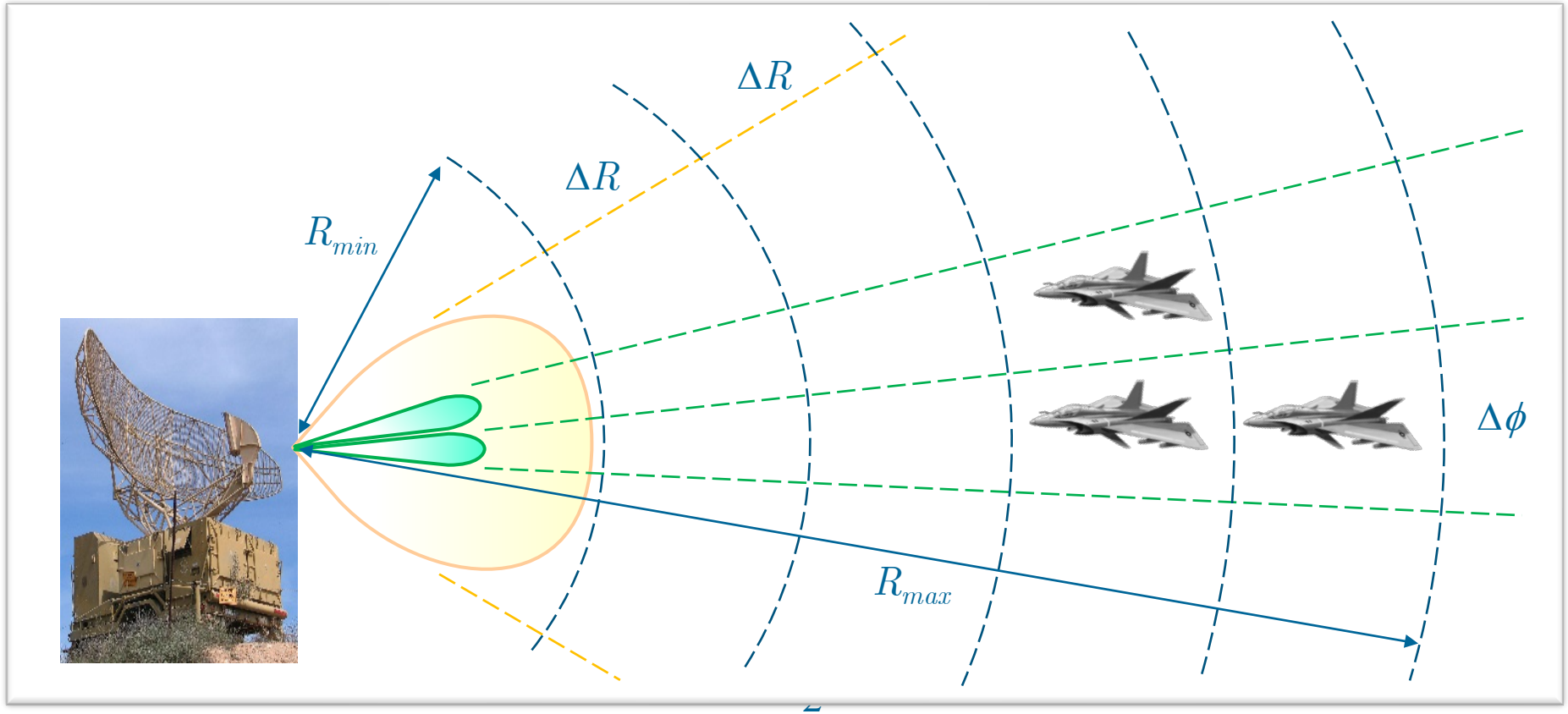
– Según la forma de onda: onda continua o radar pulsado





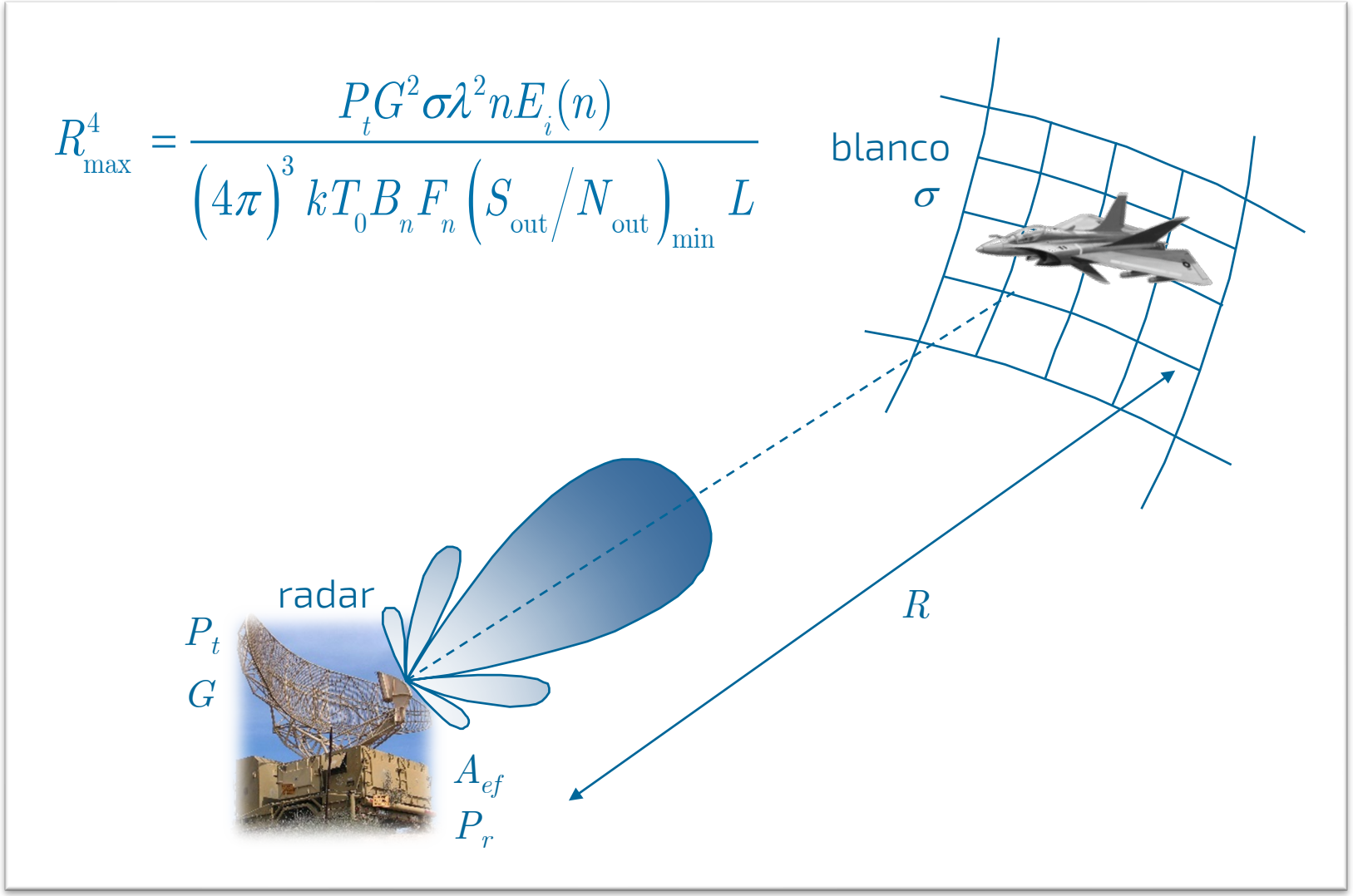
Clasificación (III)

- Radar pulsado

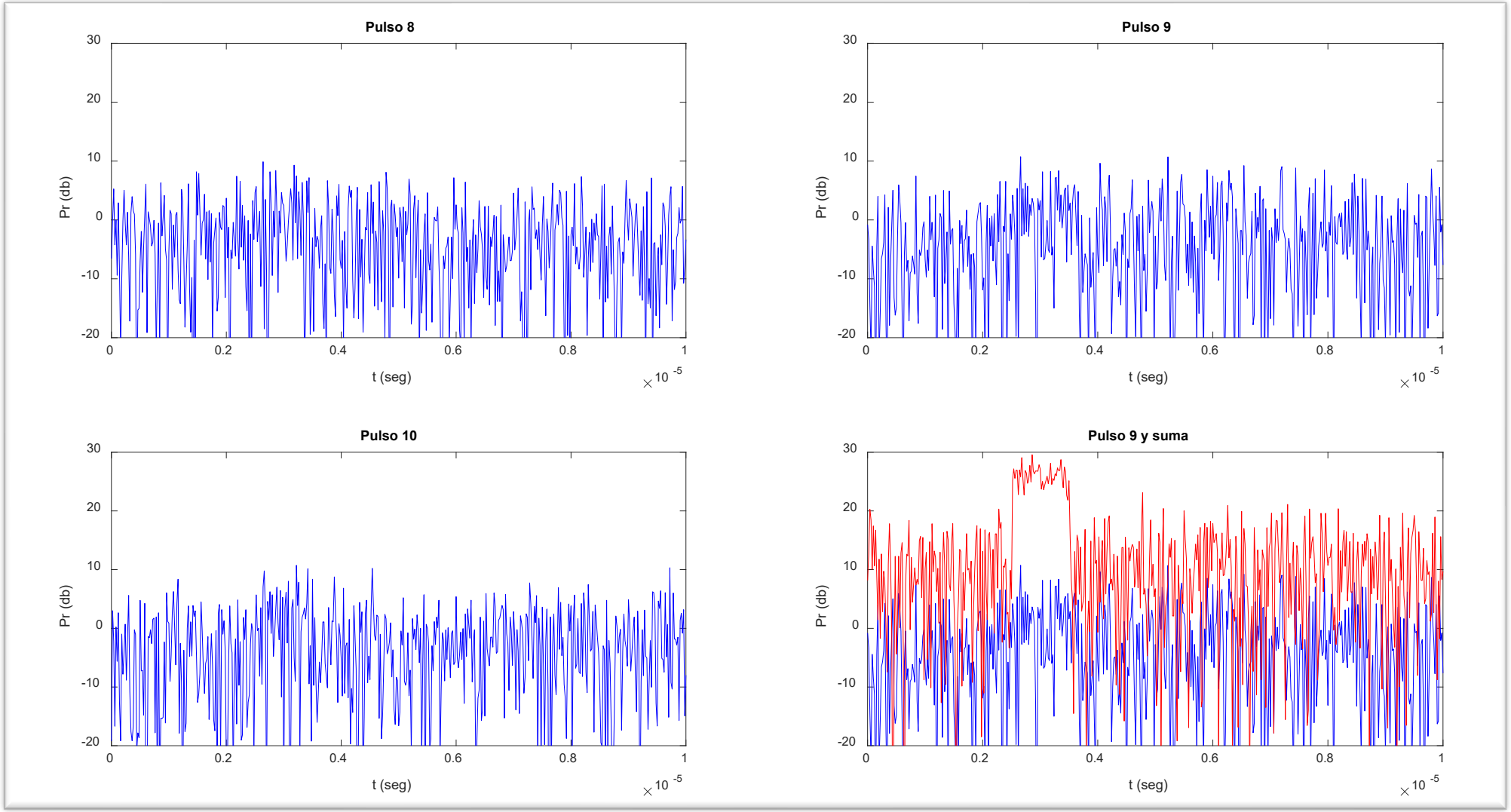


Ecuación radar

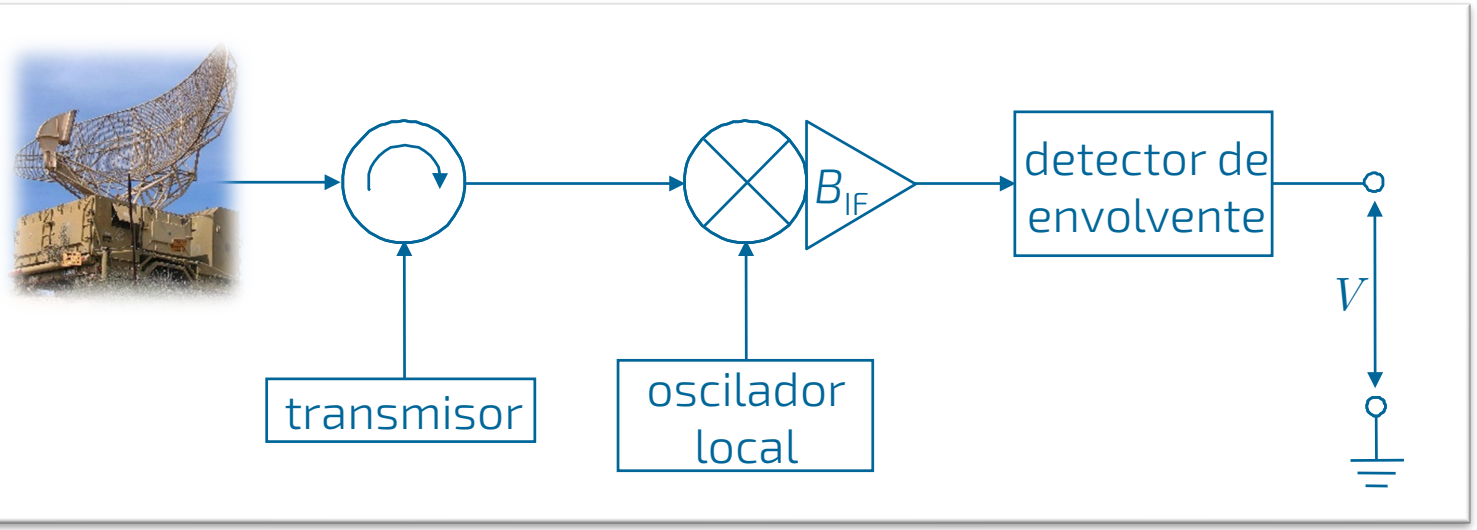
$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2 n E_i(n)}{(4\pi)^3 k T_0 B_n F_n \left(S_{\text{out}}/N_{\text{out}}\right)_{\min} L}$$

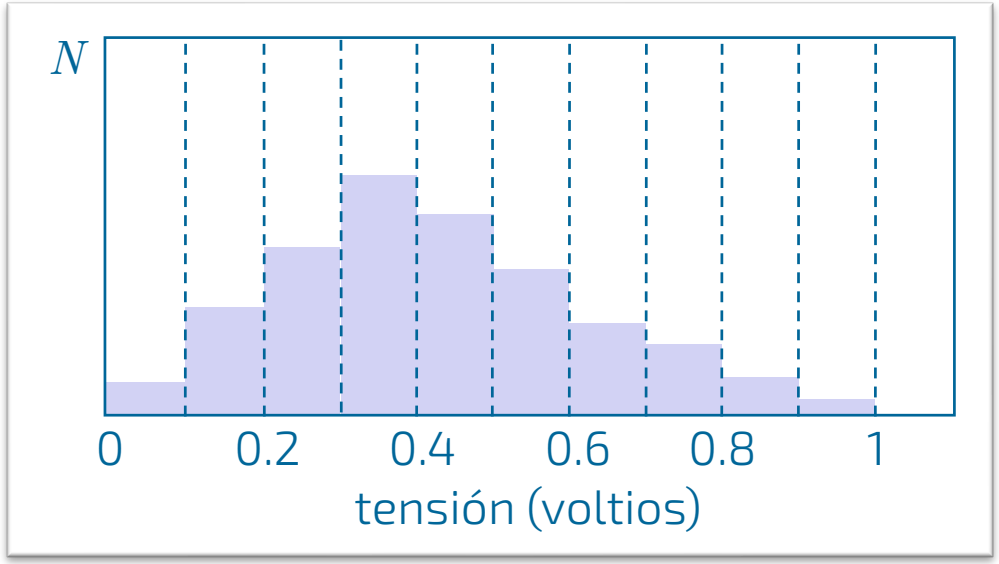


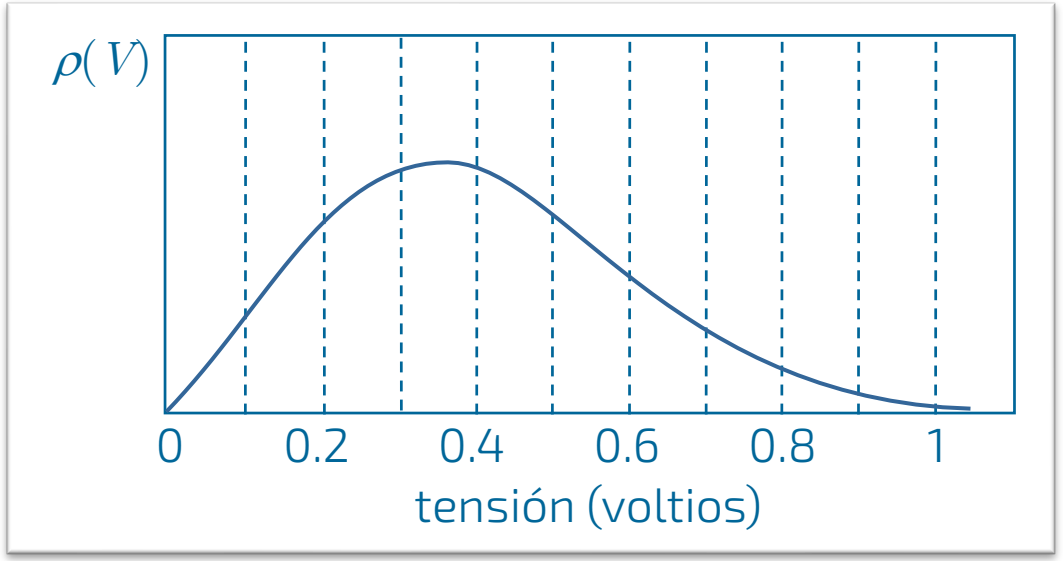
Integración de pulsos (f_{rp}=100 MHz; τ=1 μs; 20 pulsos)



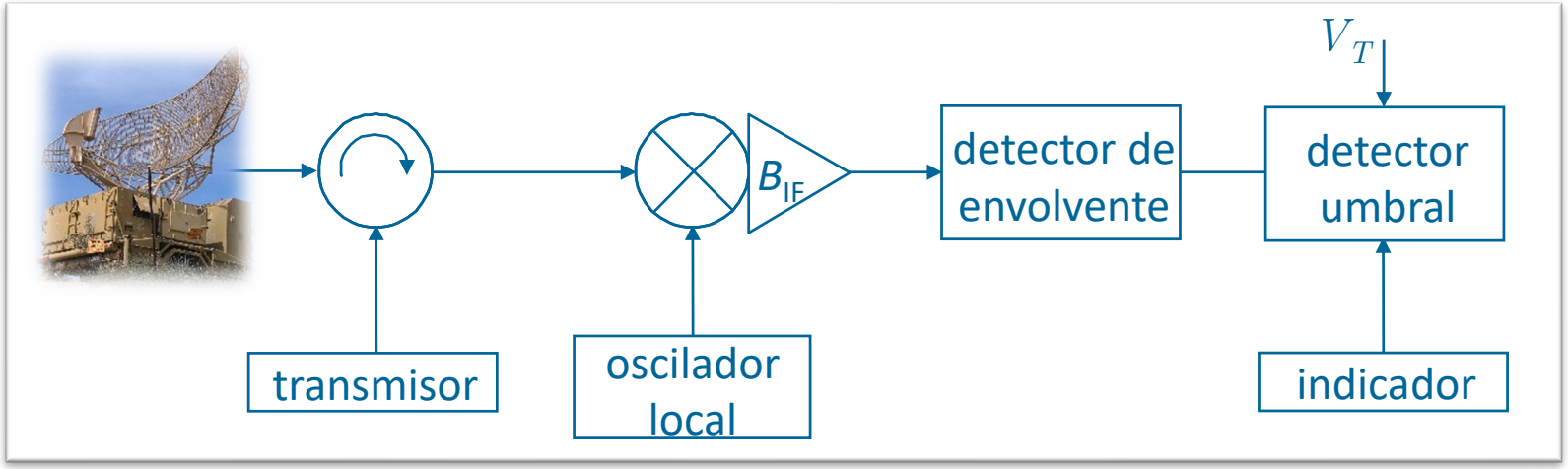
Detección radar (I)

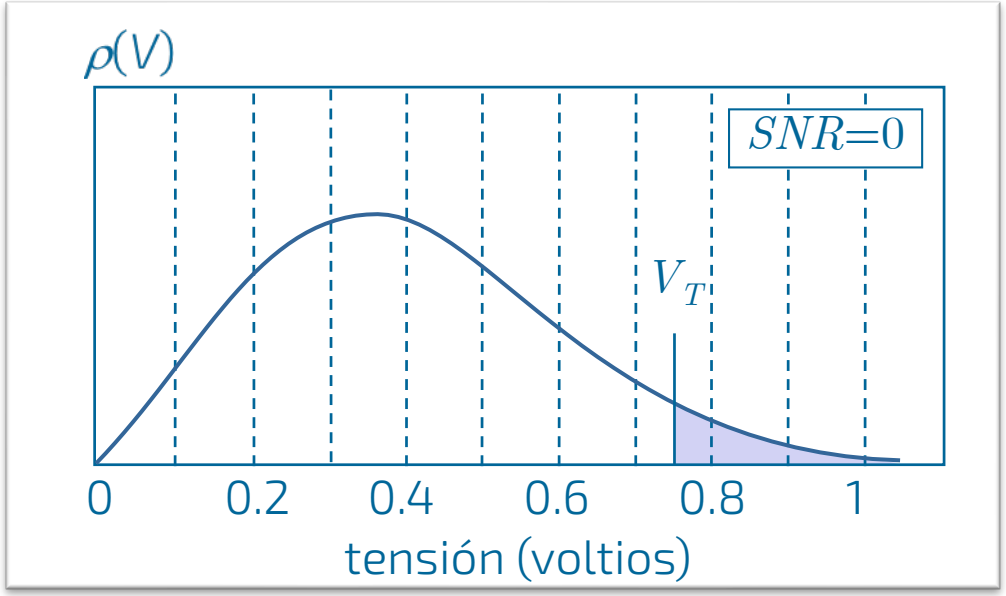




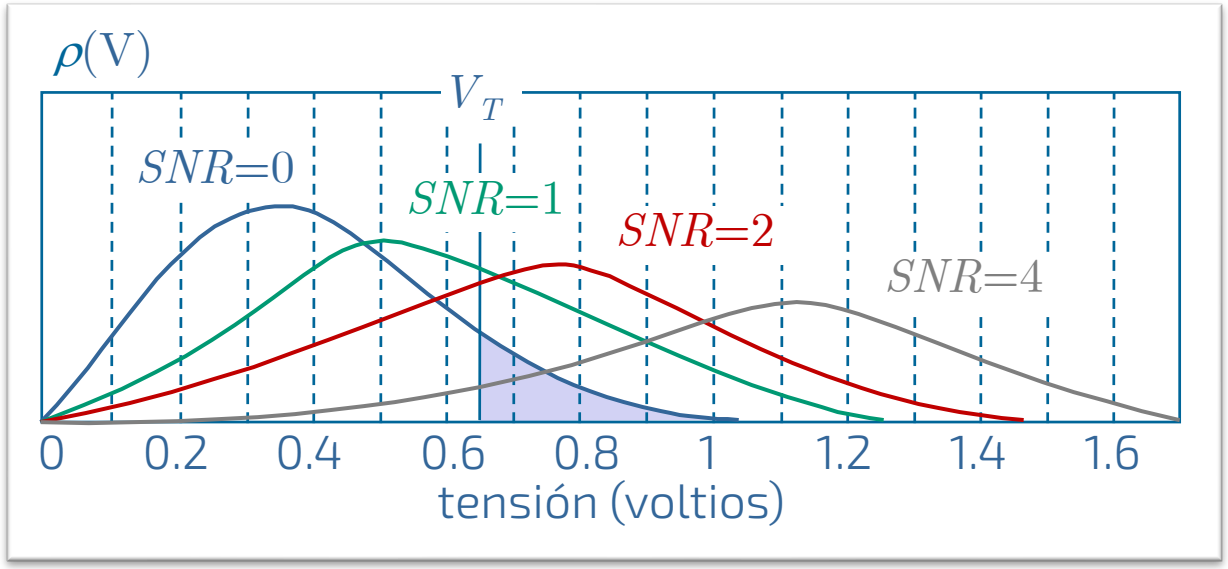


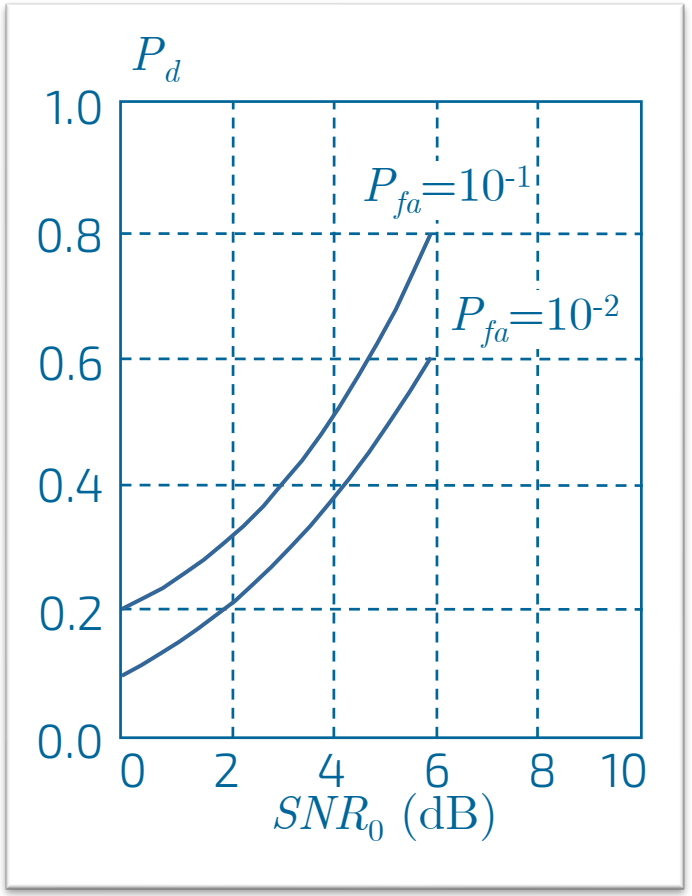
Detección radar (II)



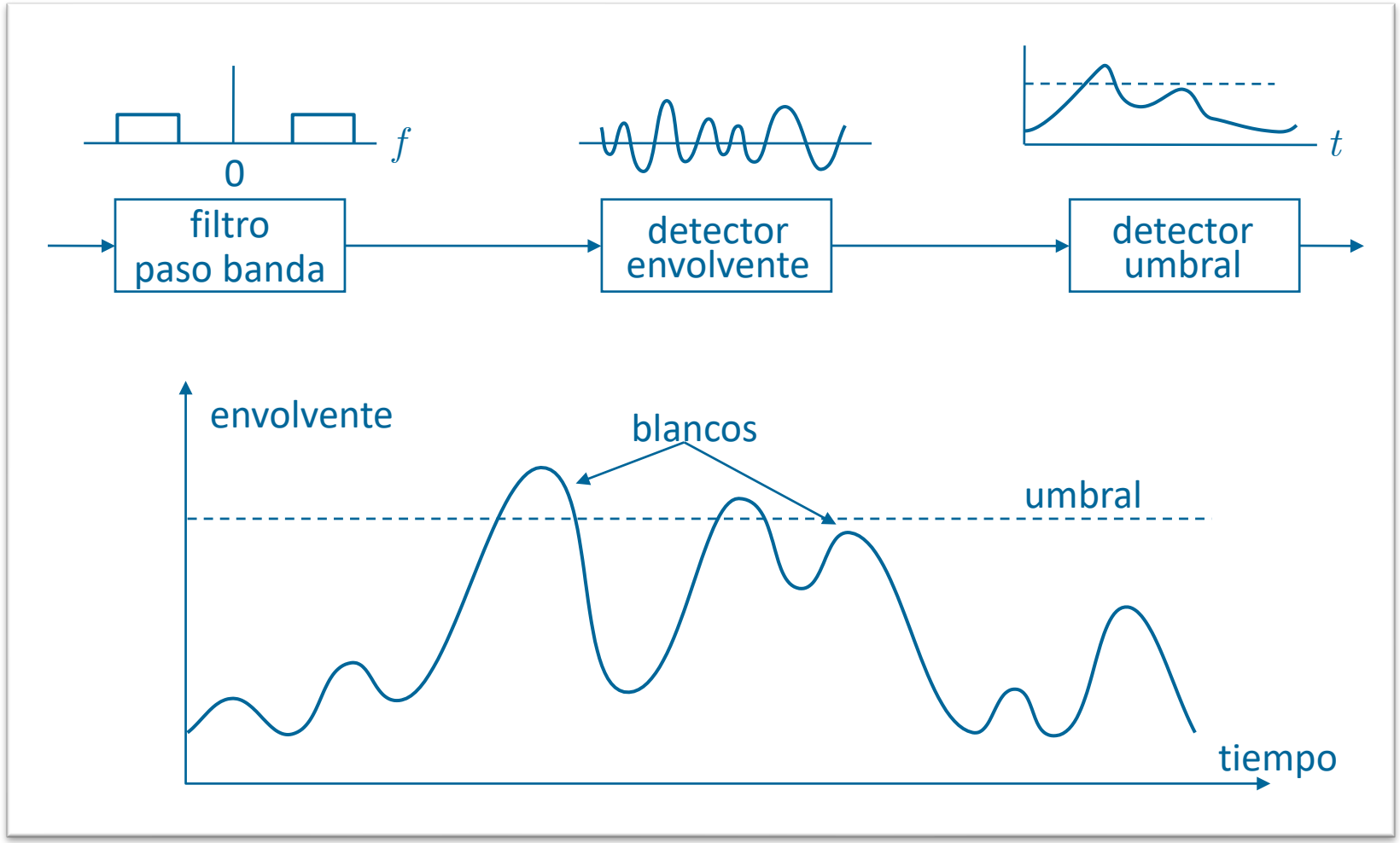


Detección radar (III)





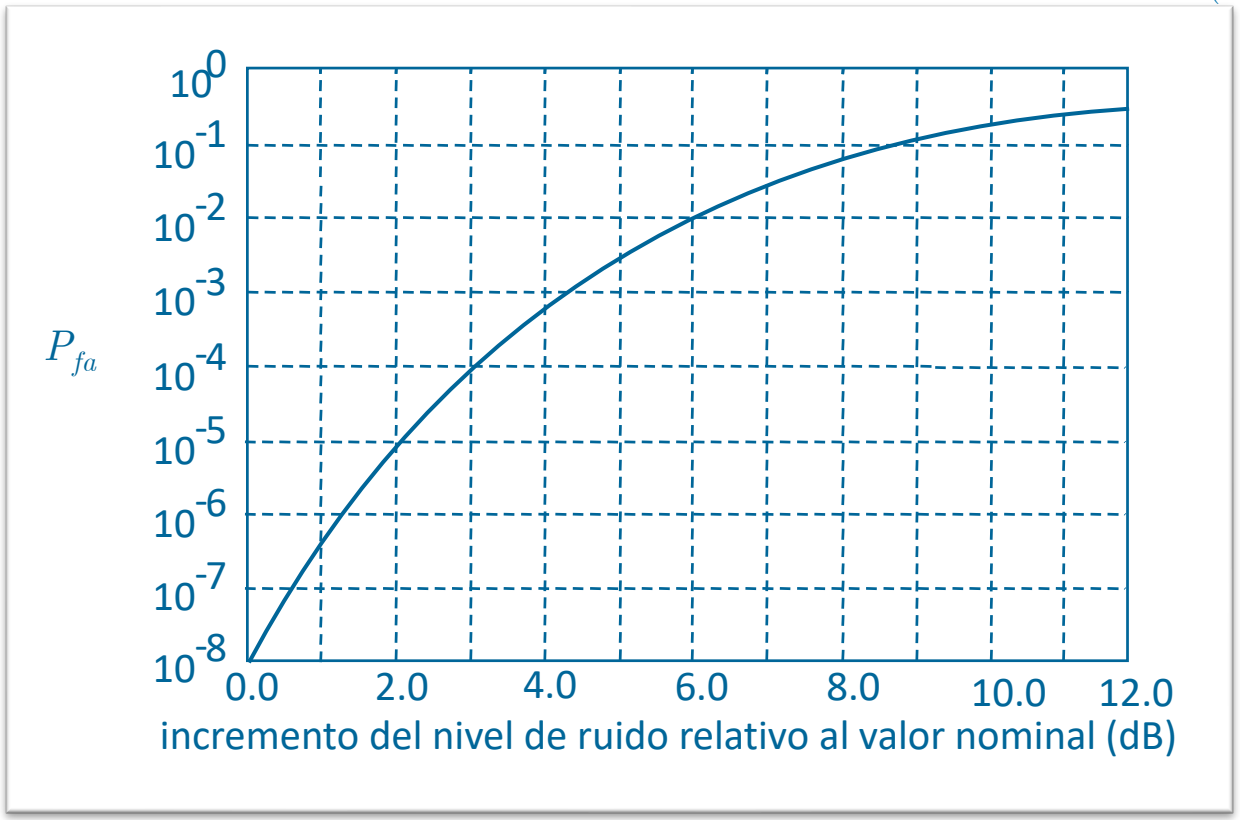
Detección radar (IV)



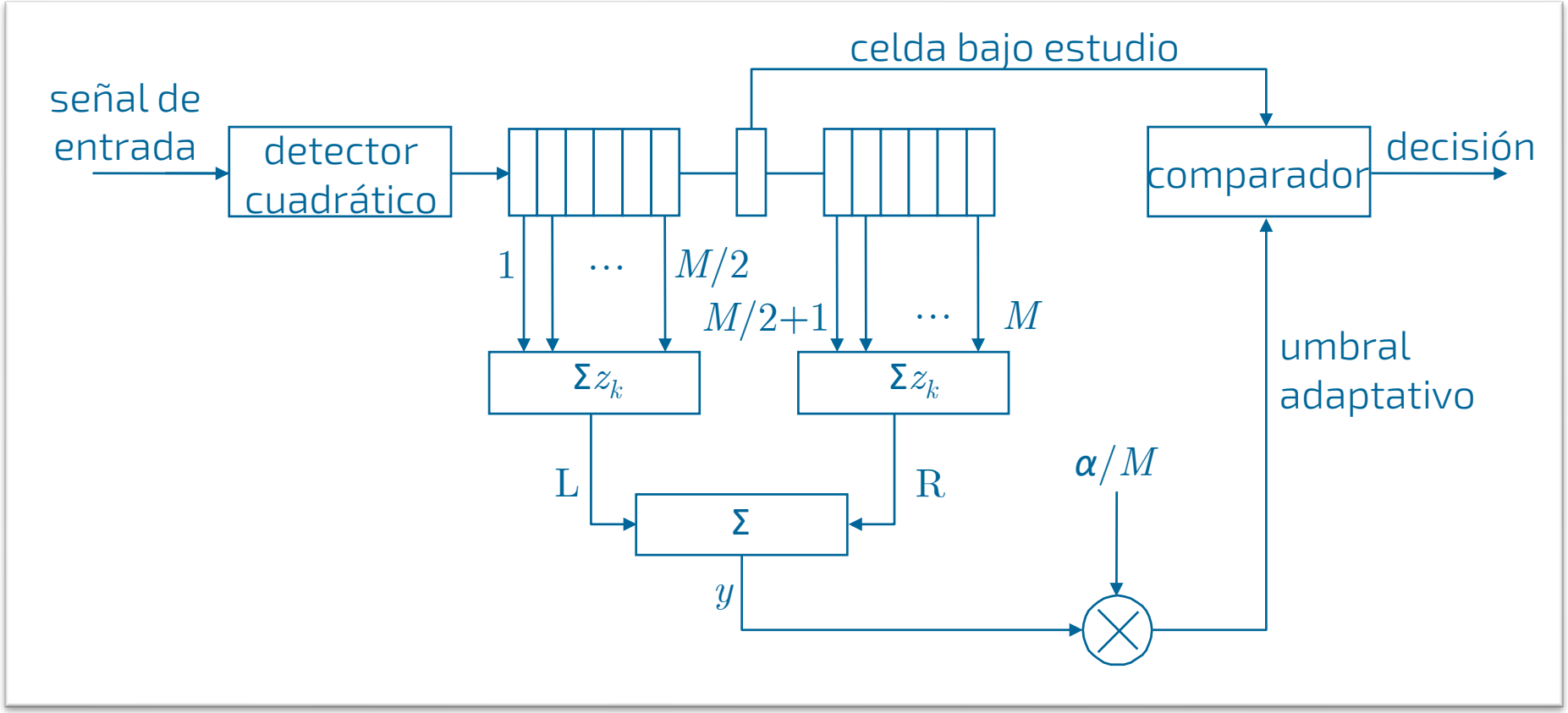
Técnicas CFAR (Constant False Alarm Rate)

- Pfa muy sensible a los valores de ruido

$$P_{fa} = \left(-\frac{v_T^2}{2\beta^2} \right) \qquad P_{fa} = \left(P_{fa}^{(nom)} \right)^{\beta_{(nom)}^2/\beta^2} \qquad x = 10\log\frac{\beta^2}{\beta_{(nom)}^2}$$



CA–CFAR (I)



– M celdas con muestras independientes y misma función densidad de probabilidad (Rayleigh)

CA–CFAR (III)

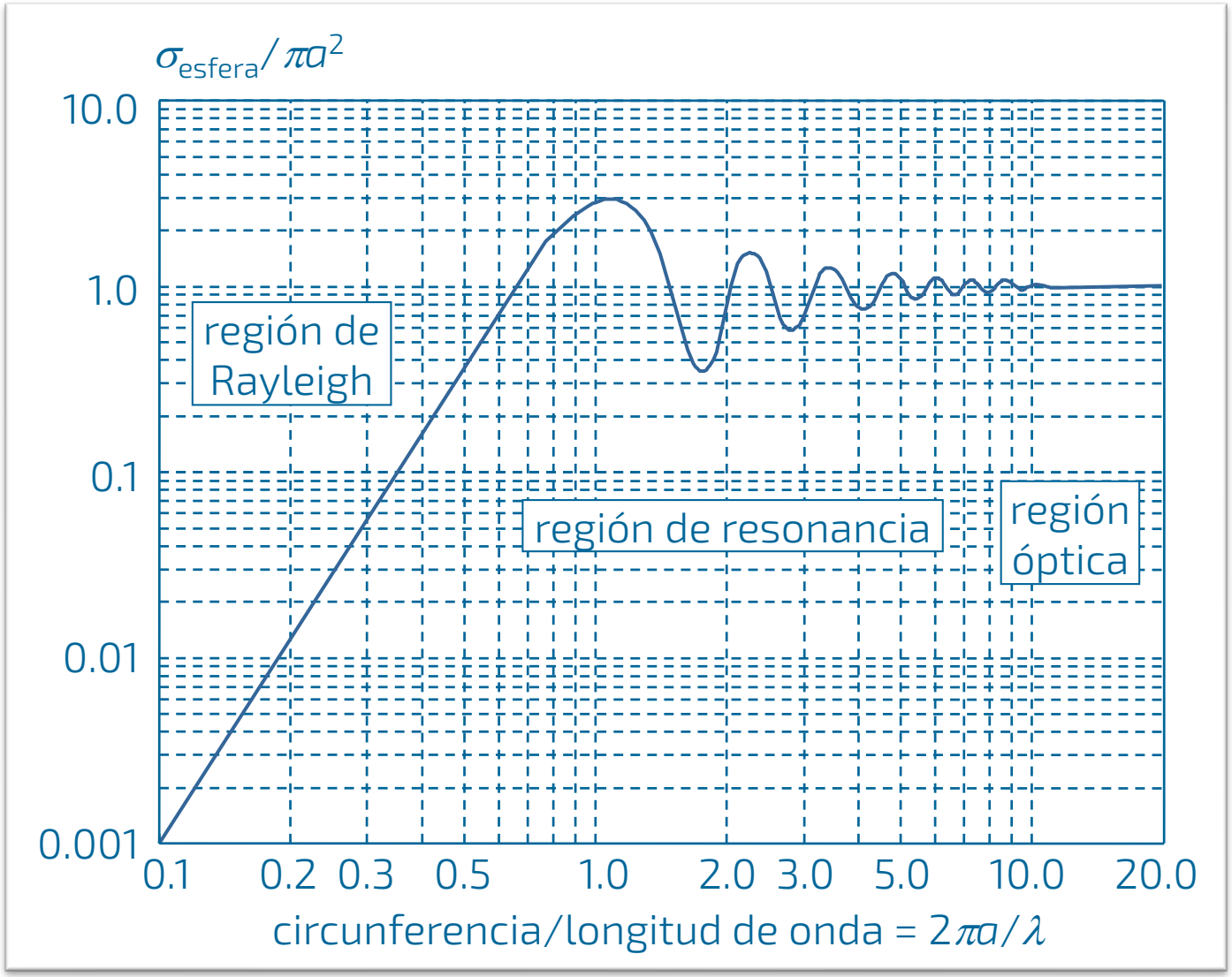
- Probabilidad de detección

$$P_d\left(\overline{SNR},\alpha,M\right)=\left[1+\frac{\alpha}{M\left(1+\overline{SNR}\right)}\right]^{-M}$$

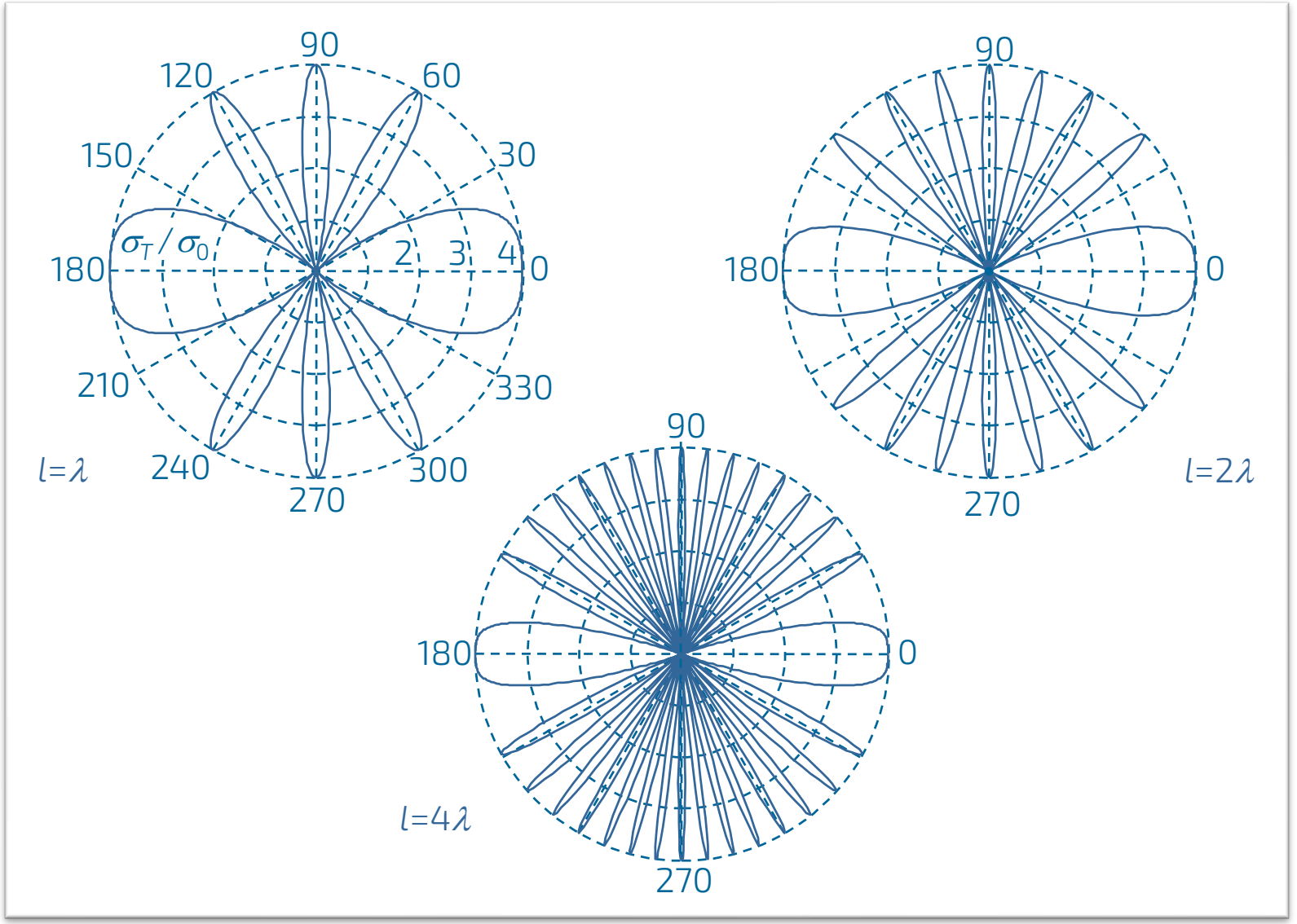
- Probabilidad de falsa alarma dependiente de M y α pero **independiente del ruido**

$$P_{fa}\left(\alpha,M\right)=\left(1+\frac{\alpha}{M}\right)^{-M}$$

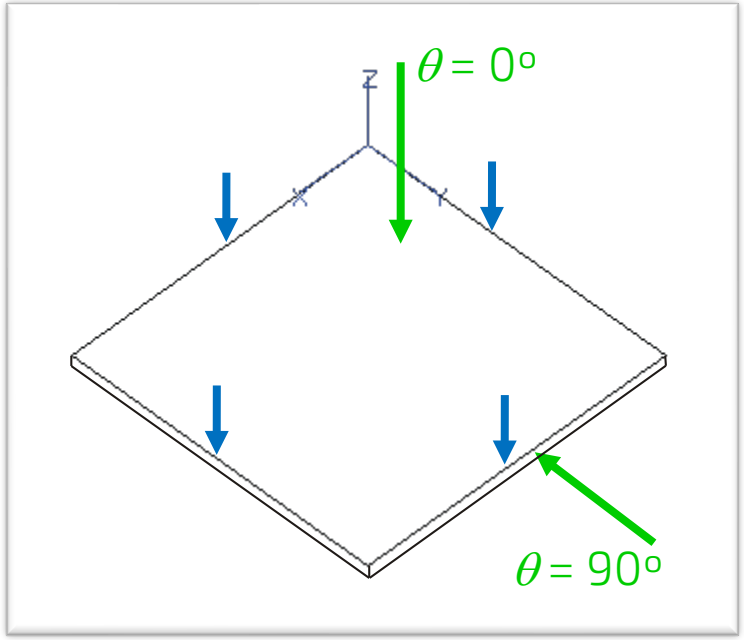
RCS de una esfera

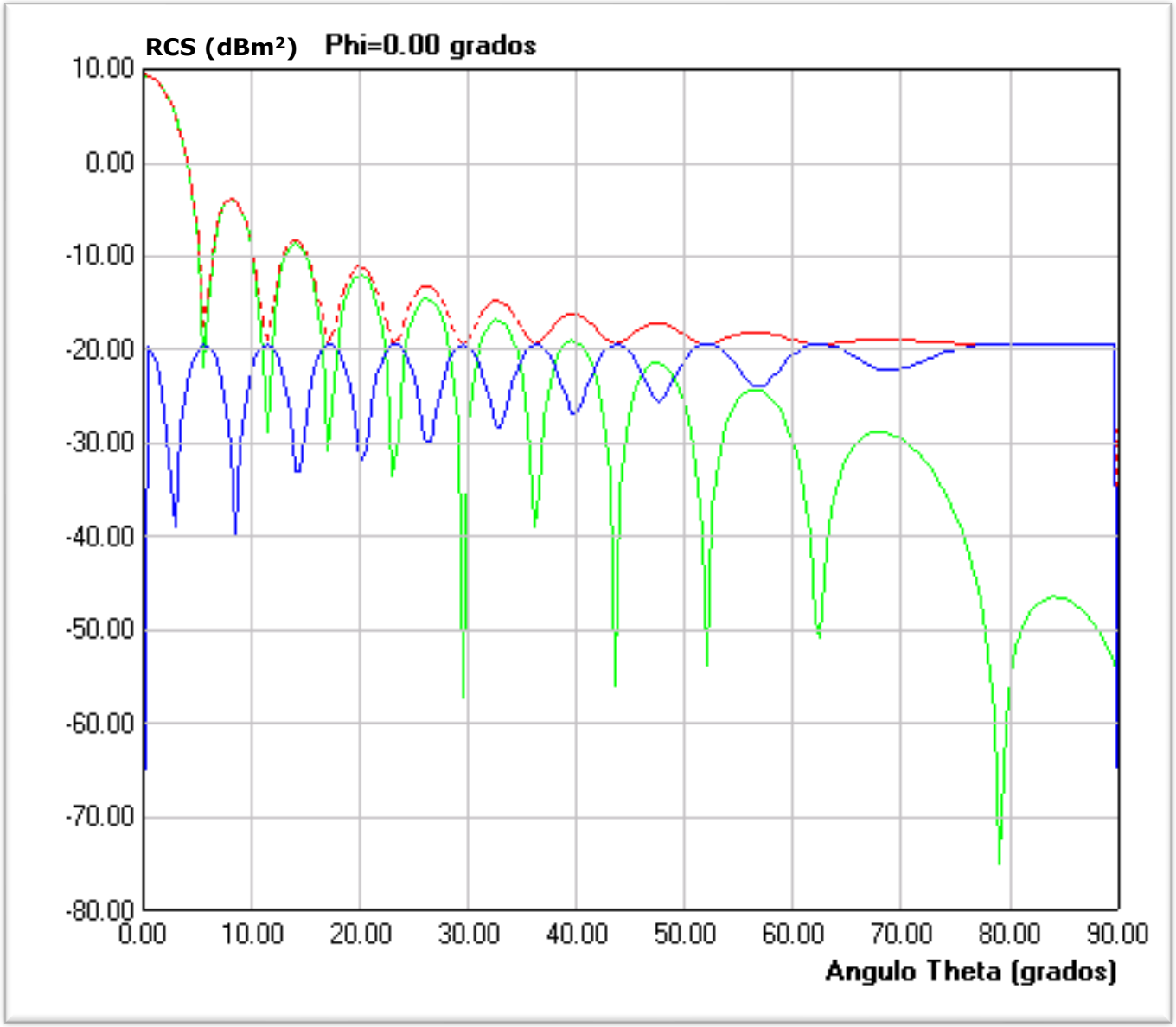


RCS de dos esferas



Placa cuadrada de 5λ (I)





Placa cuadrada de 5λ (II)

- Placa eléctricamente grande (influencia de las aristas despreciable)

$$\sigma\left(\theta\right)=\frac{4\pi A^2}{\lambda^2}\left[\frac{\sin\left(ka\sin\theta\right)}{ka\sin\theta}\right]^2\cos^2\theta \quad ; \quad A=a^2$$

$$\left.\begin{array}{l}\theta=0\Rightarrow\sigma=\dfrac{4\pi A^2}{\lambda^2}\\ \theta=90\Rightarrow\sigma=0\end{array}\right\}\ \theta \text{ medido con respecto a la normal de la placa}$$

- En nuestro caso:

$$f=9.227\ \text{GHz}\Rightarrow\lambda=0.0325\ \text{m}$$

$$a=5\lambda=0.1625\ \text{m}\Rightarrow A=a^2=0.02643\ \text{m}^2$$

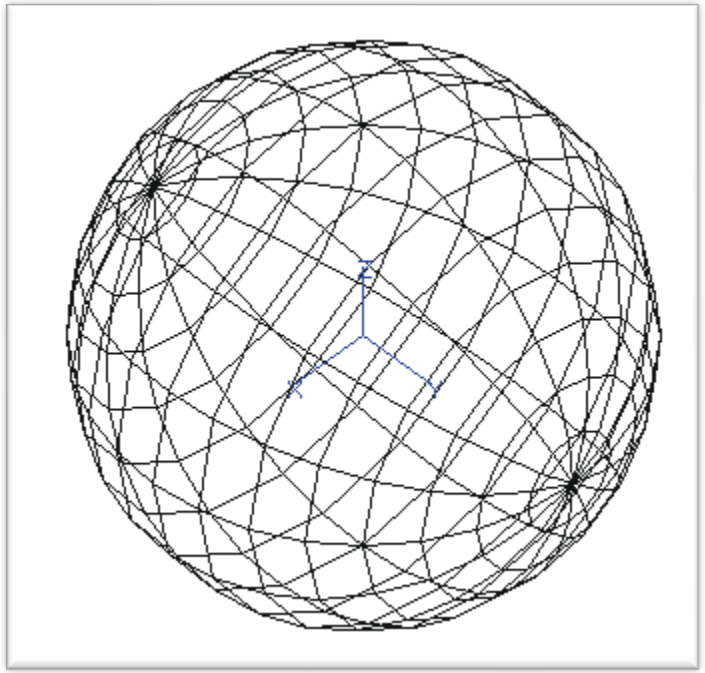
$$\sigma(0)=\frac{4\pi A^2}{\lambda^2}=8.3025\ \text{m}^2=9.19\ \text{dBm}^2$$

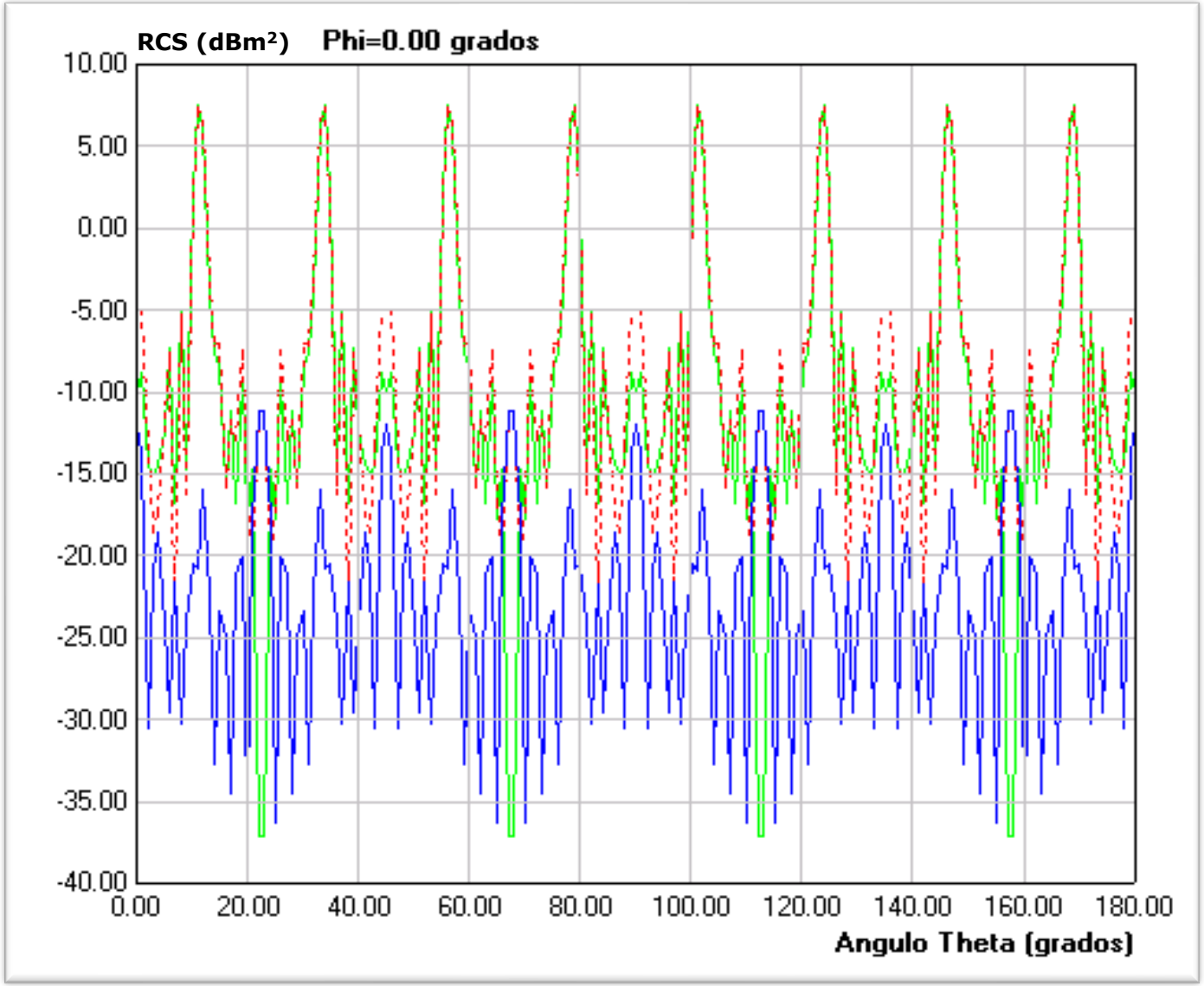
Esfera 256 parches (496 aristas)

$$\sigma(\theta) = \pi a^2$$

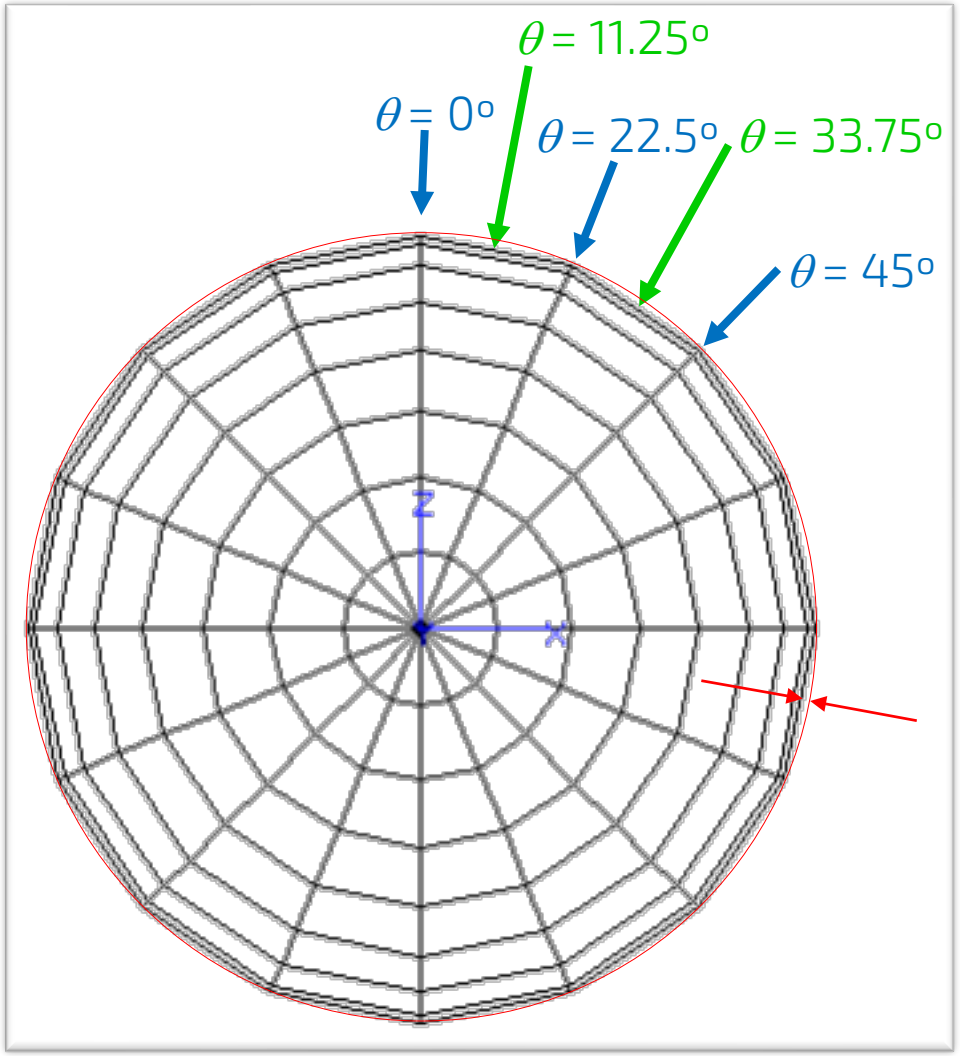
$$a = 1 \text{ m}$$

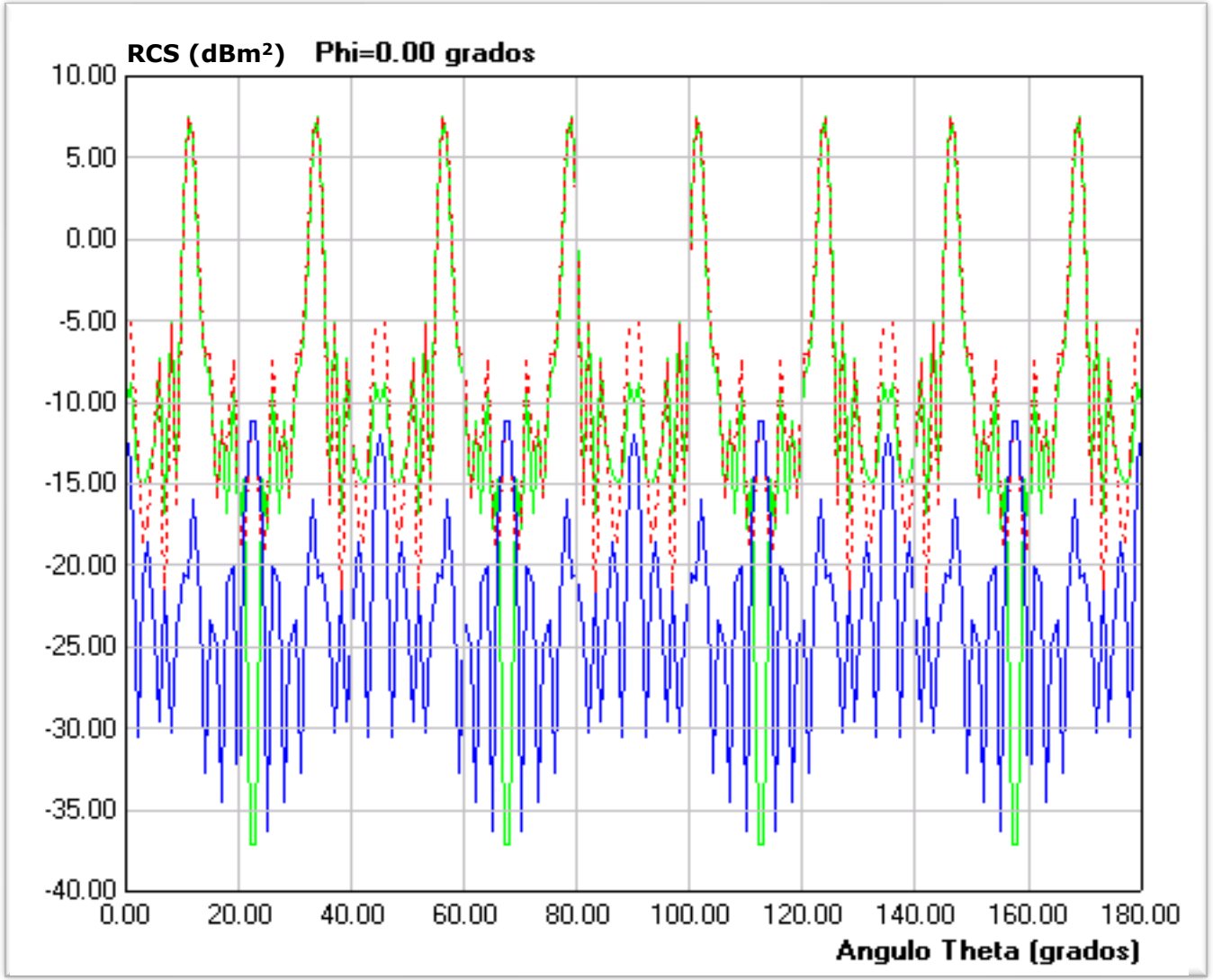
$$\sigma = 3.1416 \text{ m}^2 = 4.97 \text{ dBm}^2$$





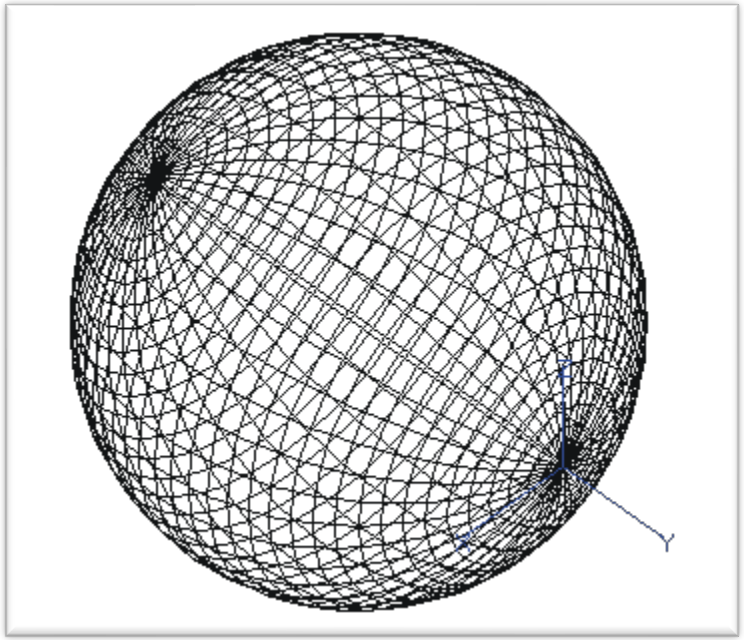
Esfera 256 parches (496 aristas)

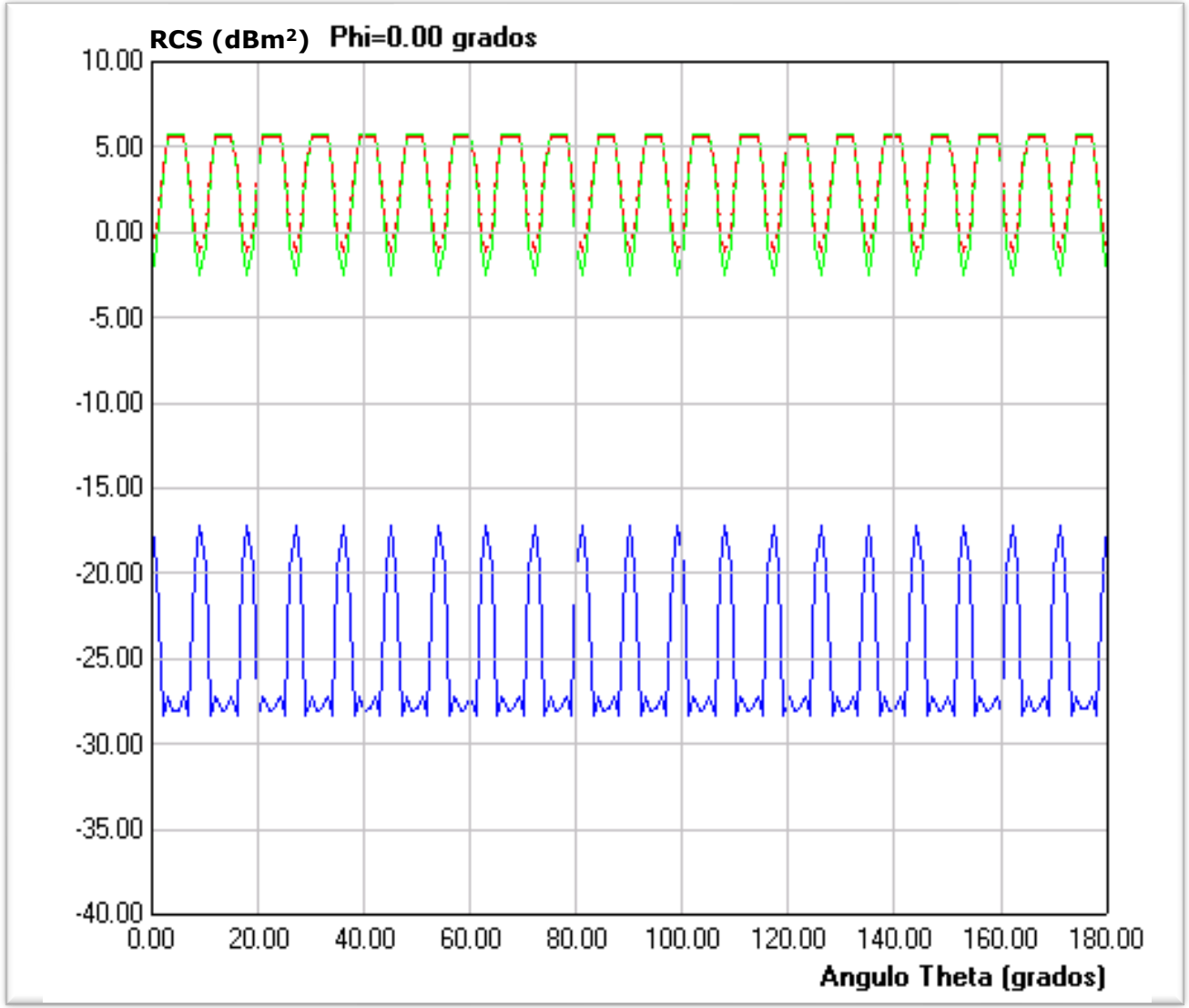




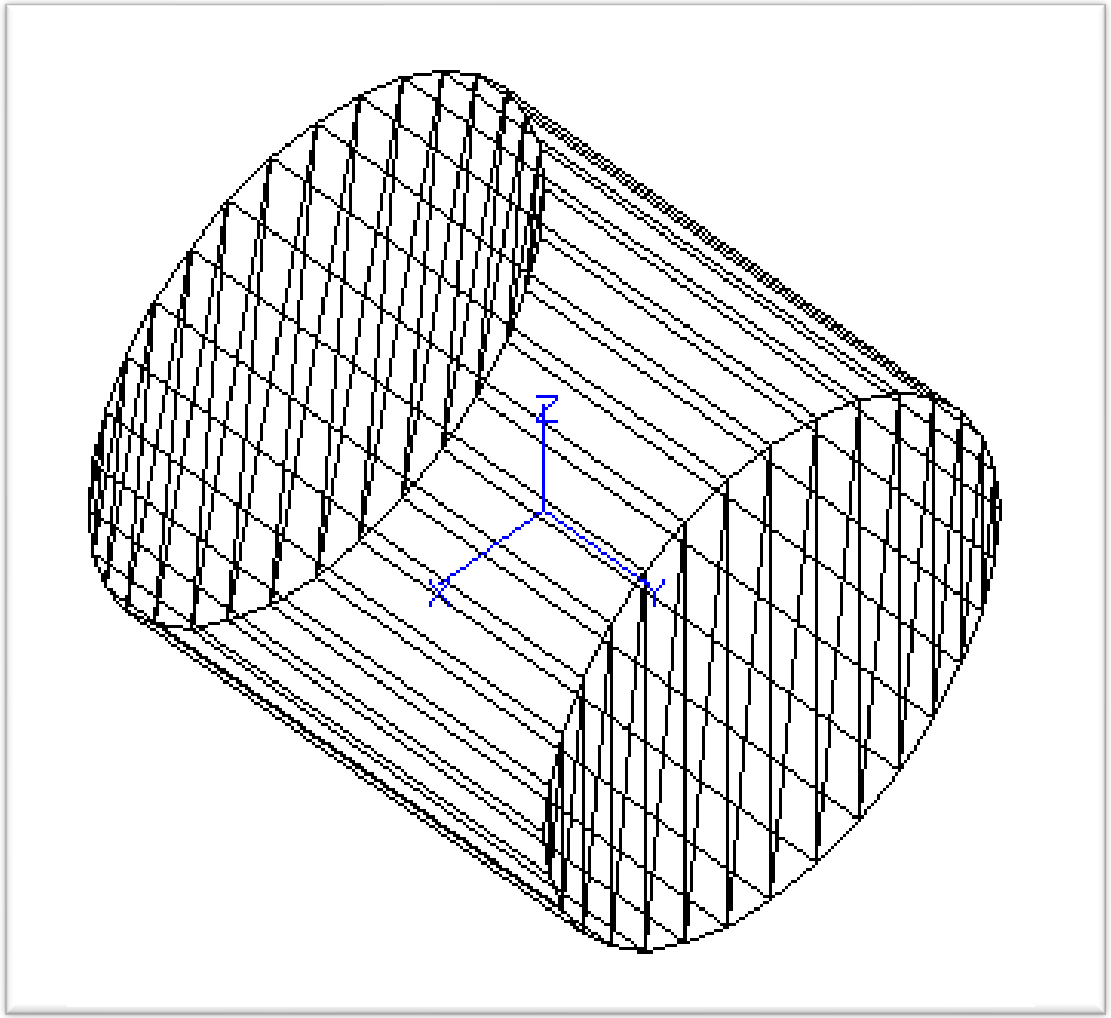
Esfera 1600 parches (±3200 aristas)

$$\sigma(\theta) = \pi a^2$$
$$a = 1 \text{ m}$$
$$\sigma = 3.1416 \text{ m}^2 = 4.97 \text{ dBm}^2$$

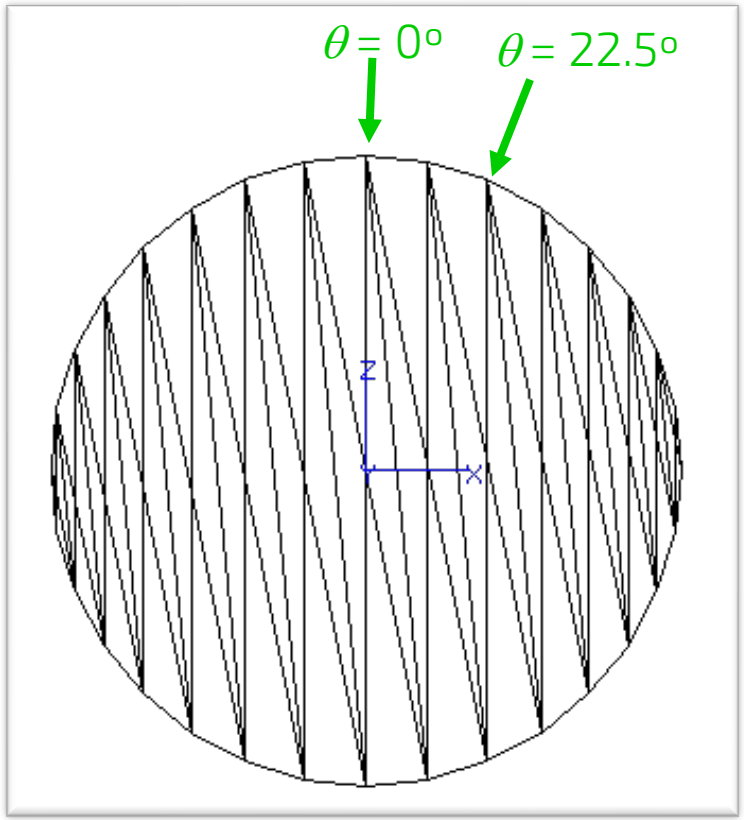


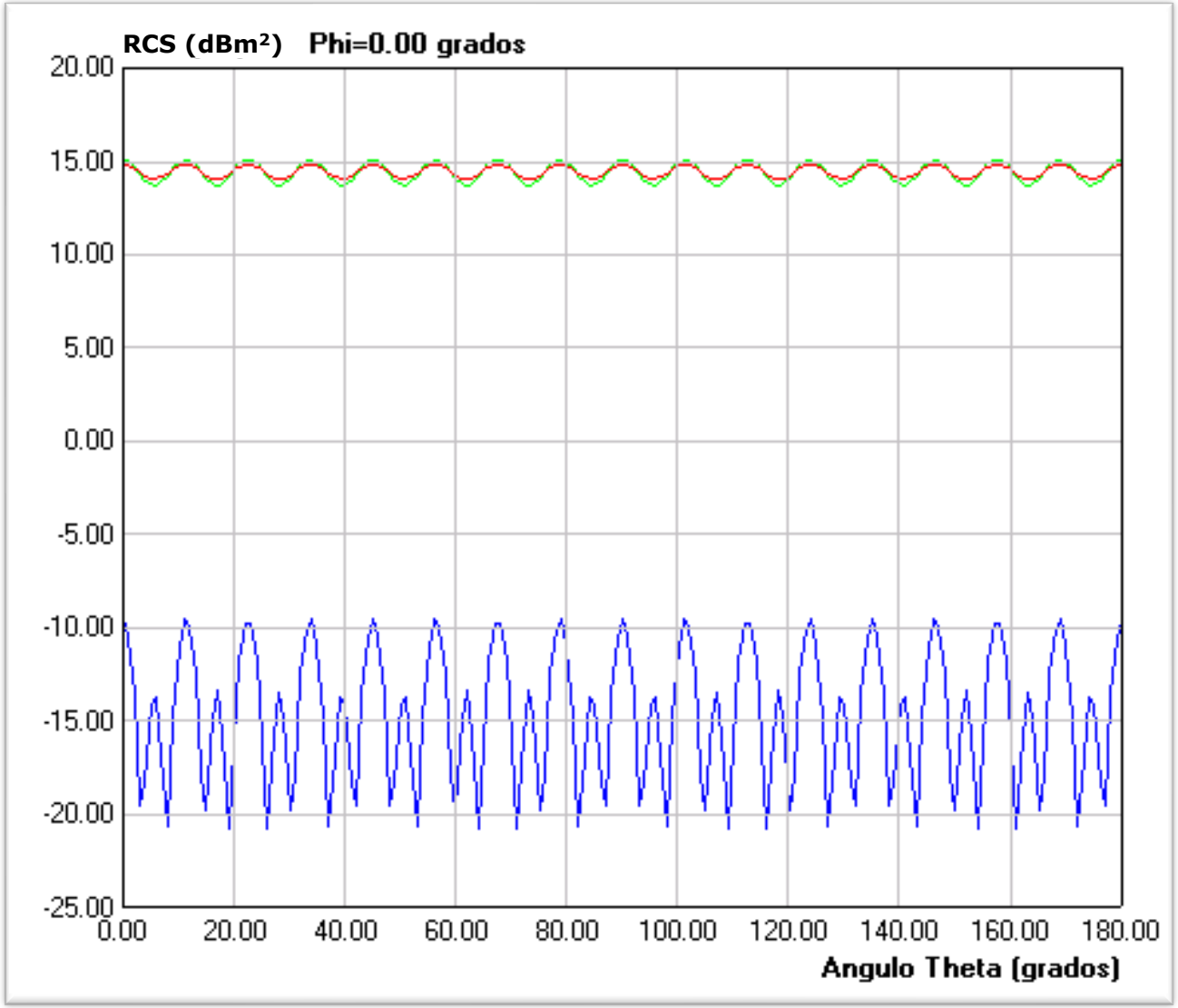


Cilindro de 92 parches (154 aristas) – Corte ϕ=cte

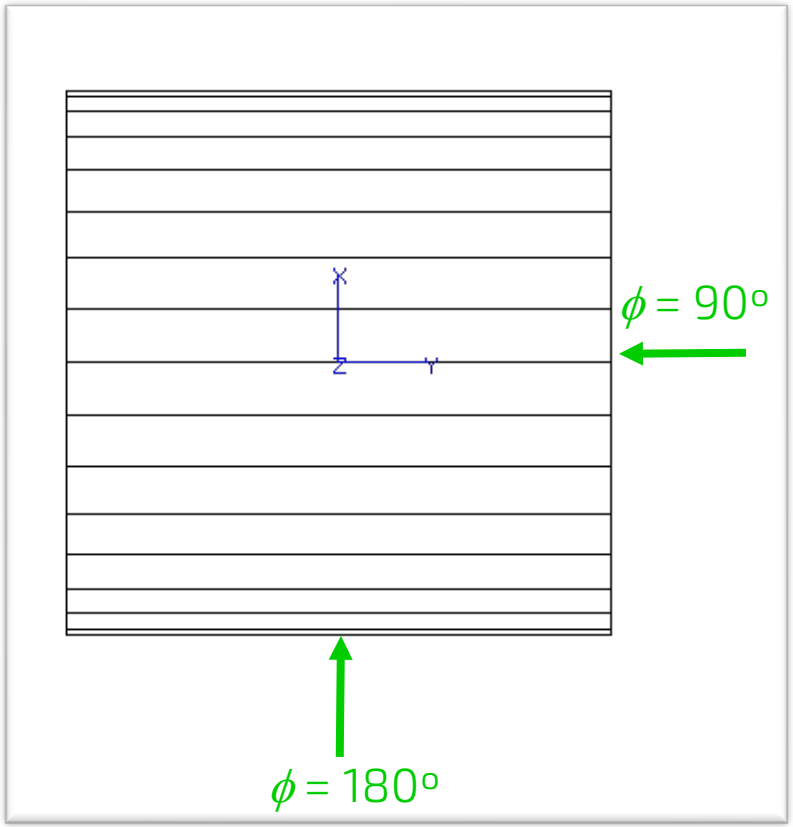


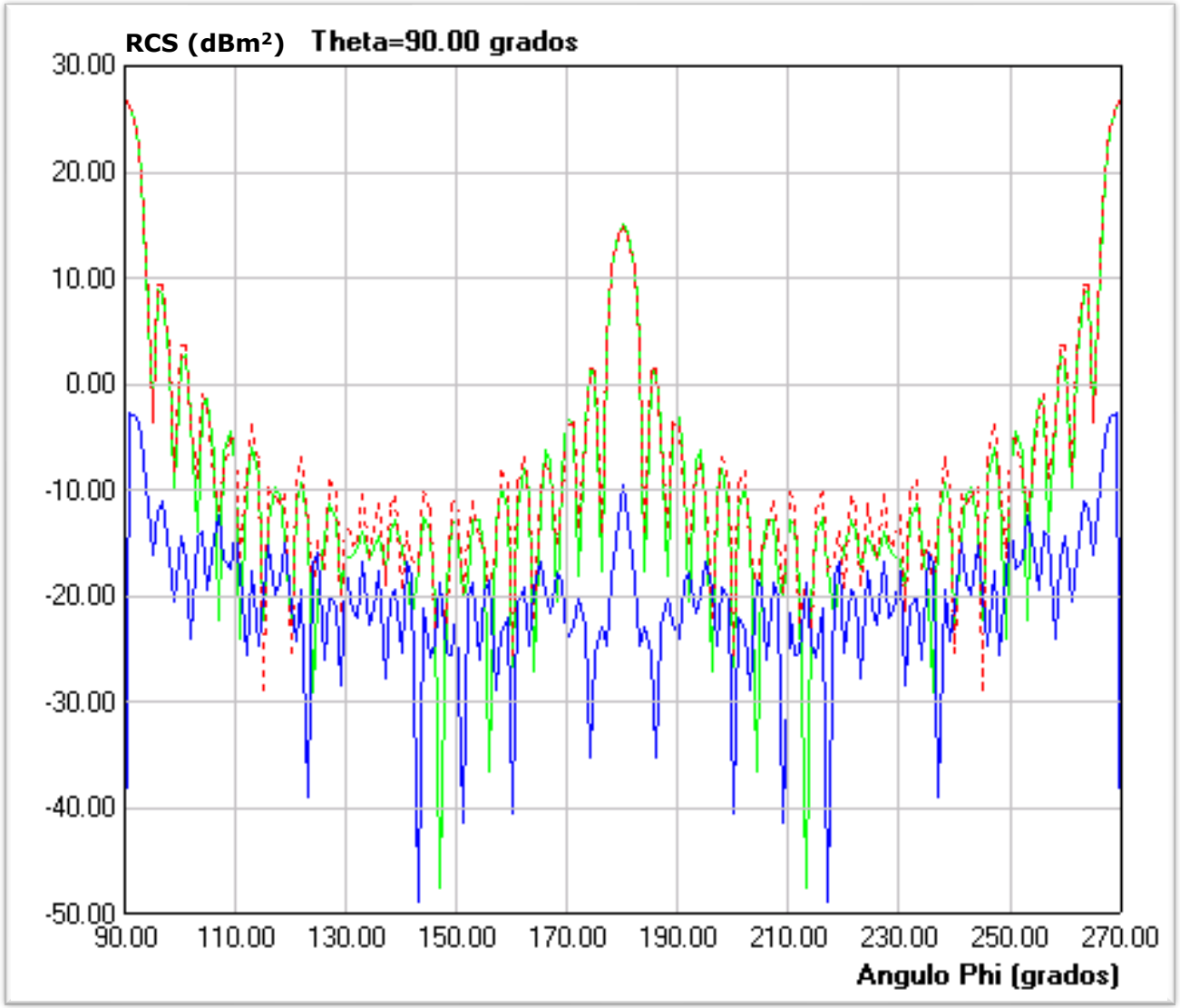
Cilindro de 92 parches (154 aristas) – Corte ϕ=0º (180º)





Cilindro de 92 parches (154 aristas) – Corte θ=90º





RCS de un cilindro de radio a=0.55 m y longitud l=1 m

- Placa circular plana (cilindro visto a lo largo de su eje):

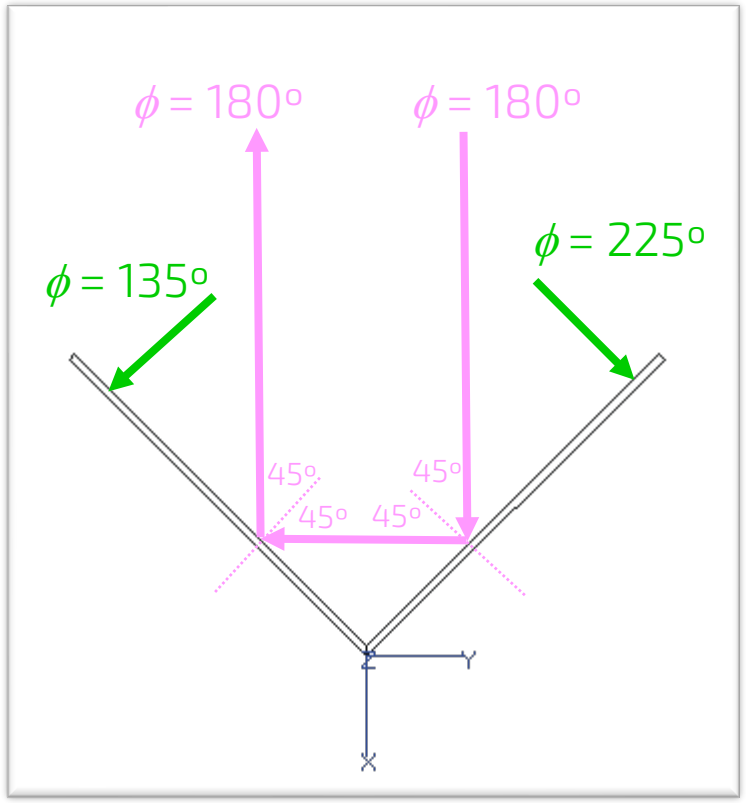
$$\sigma(\theta) = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2}\left[2\frac{J_1(2ka\sin\theta)}{2ka\sin\theta}\right]^2 \cos^2\theta \quad ; \quad A = \pi a^2$$

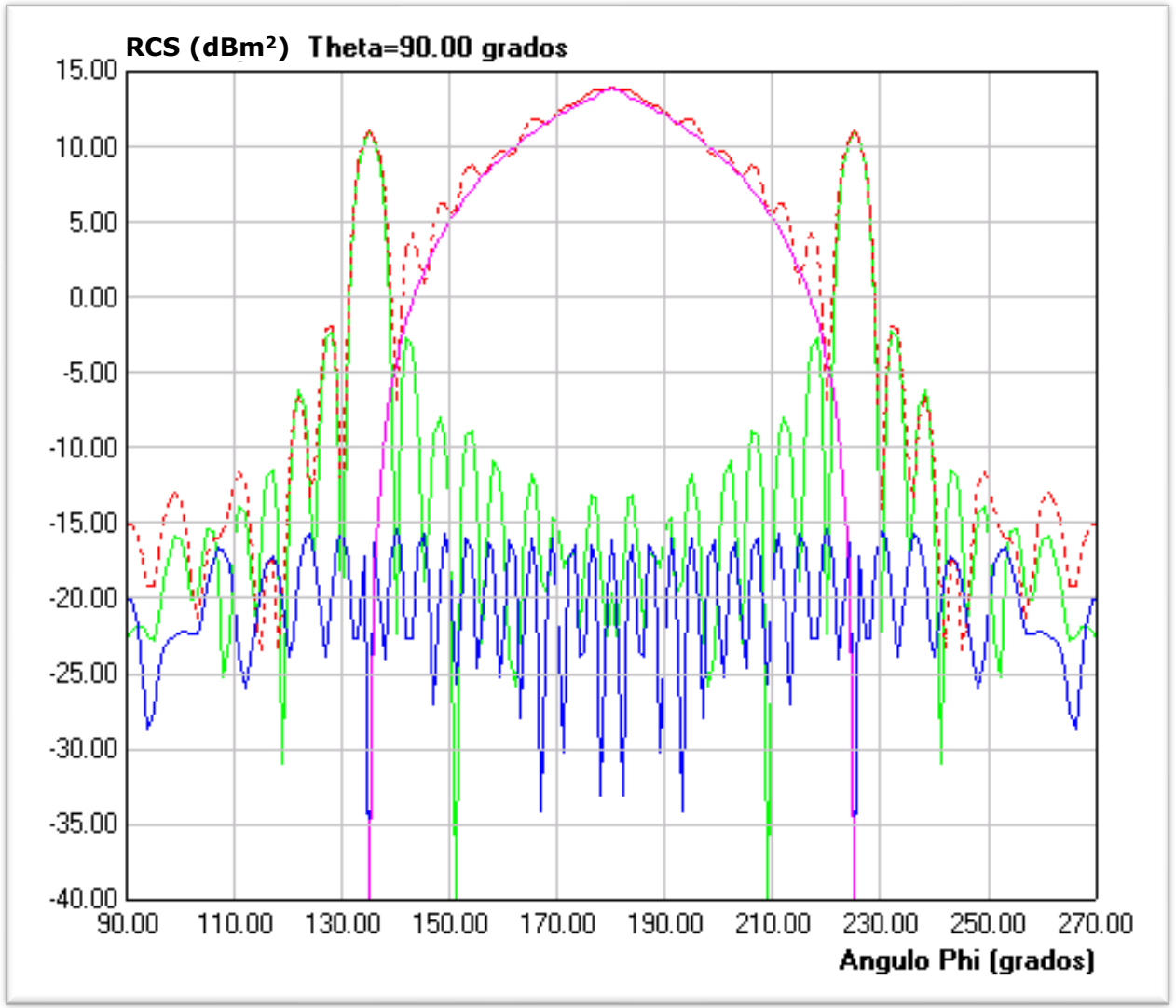
$$\theta = 0 \Rightarrow \left\{\begin{array}{c} f = 2\ \text{GHz} \Rightarrow \lambda = 0.15\ \text{m} \\ \frac{J_1(x)}{x} = \frac{1}{2} \ \text{si} \ \ x = 0 \\ A = \pi a^2 = 0.95033\ \text{m}^2 \end{array}\right\} \Rightarrow \sigma = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} = 504.4\ \text{m}^2 = 27.0277\ \text{dBm}^2$$

- Cilindro en la dirección perpendicular a su eje:

$$\sigma = \frac{2\pi\ a\ l^2}{\lambda} = 14.45\ \text{dBm}^2 \quad ; \ \text{para} \ \ \text{cilindros} \ \ \text{muy} \ \ \text{largos} \ \ (l >> a >> \lambda)$$

Diedro 90 grados (R+D+R^2) (I) – Corte θ=90º





Diedro 90 grados (R+D+RD+D^2) (II)

- Simple reflexión. Iluminación frontal para los ángulos 135 y 225 grados.

$$\sigma\left(\theta\right)=\frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \quad ; \quad A=l^2 \quad (\text{placa} \quad \text{plana})$$

$$f=9.4\ \text{GHz} \Rightarrow \lambda=0.0319\ \text{m}$$

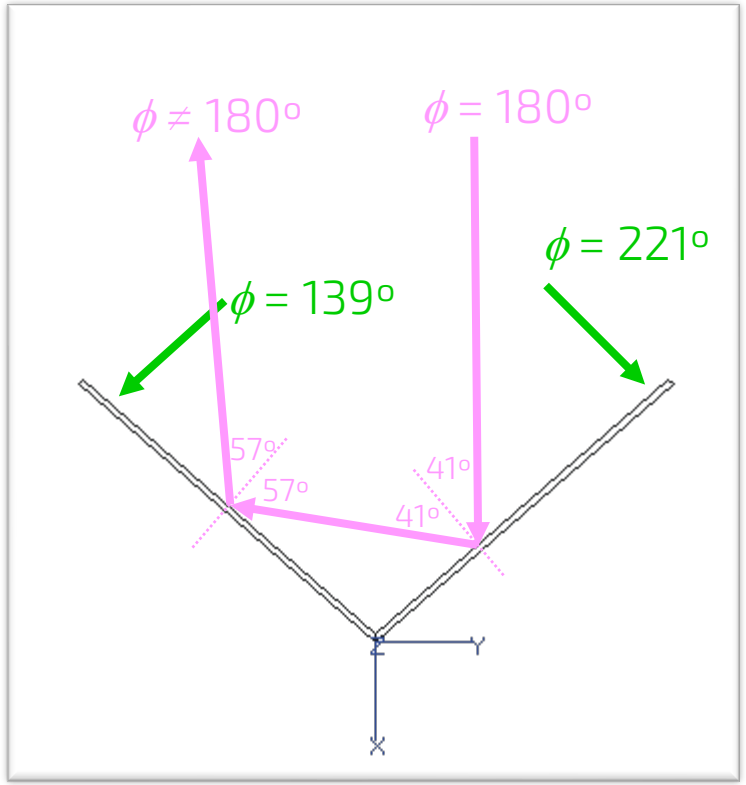
$$l=0.1790042\ \text{m} \Rightarrow \sigma=12.667\ \text{m}^2=11.03\ \text{dBm}^2$$

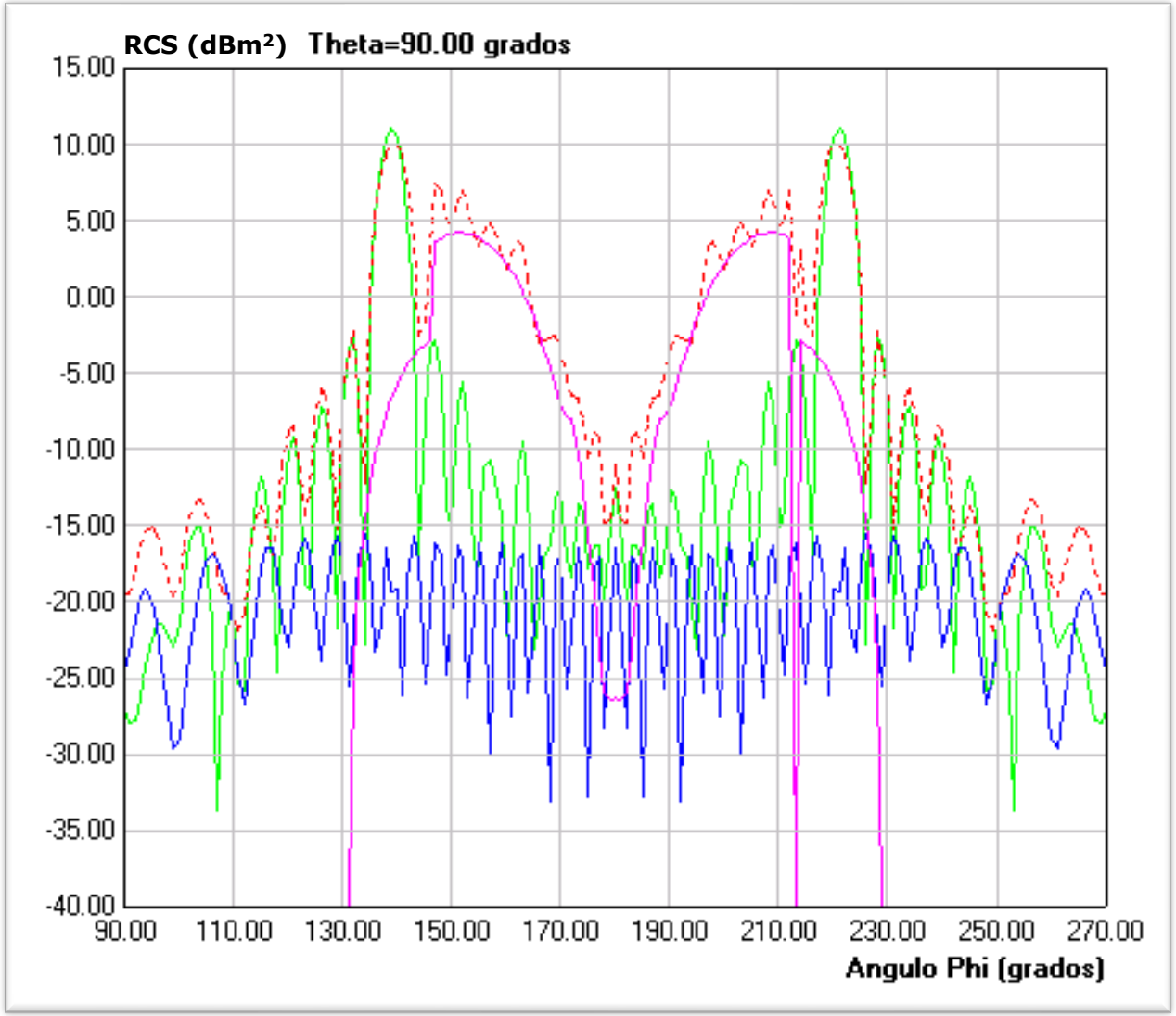
- Doble reflexión. Ángulo de 180 grados.

$$\sigma\left(\theta\right)=\frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \qquad A= \qquad = \quad l \qquad l$$

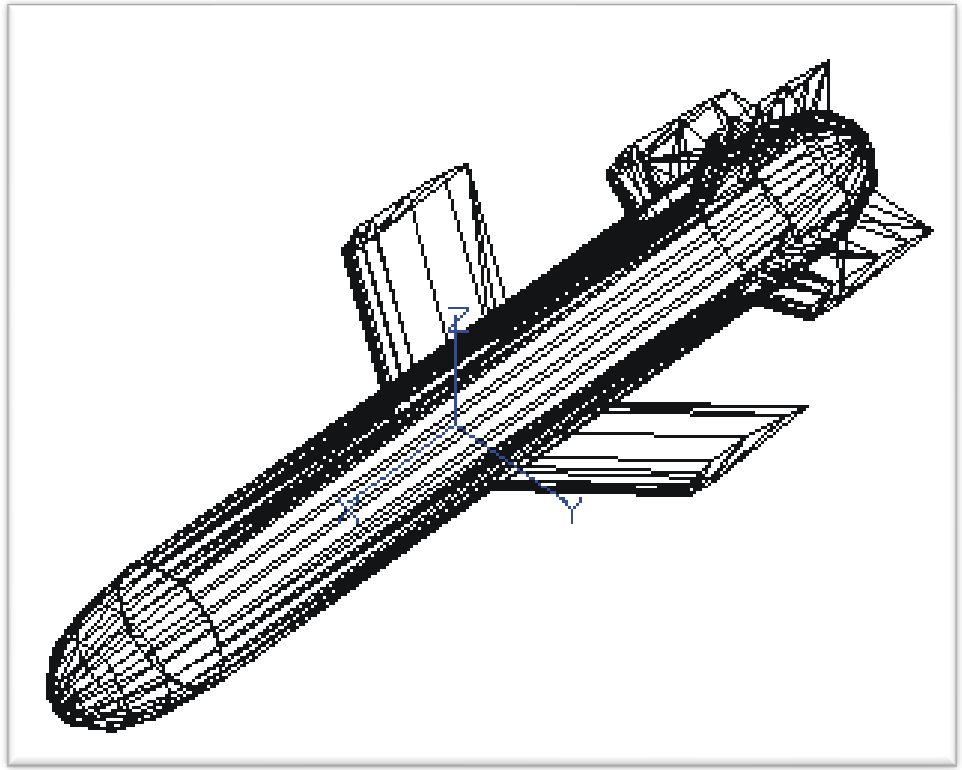
$$\sigma=25.36\ \text{m}^2=14.04\ \text{dBm}^2$$

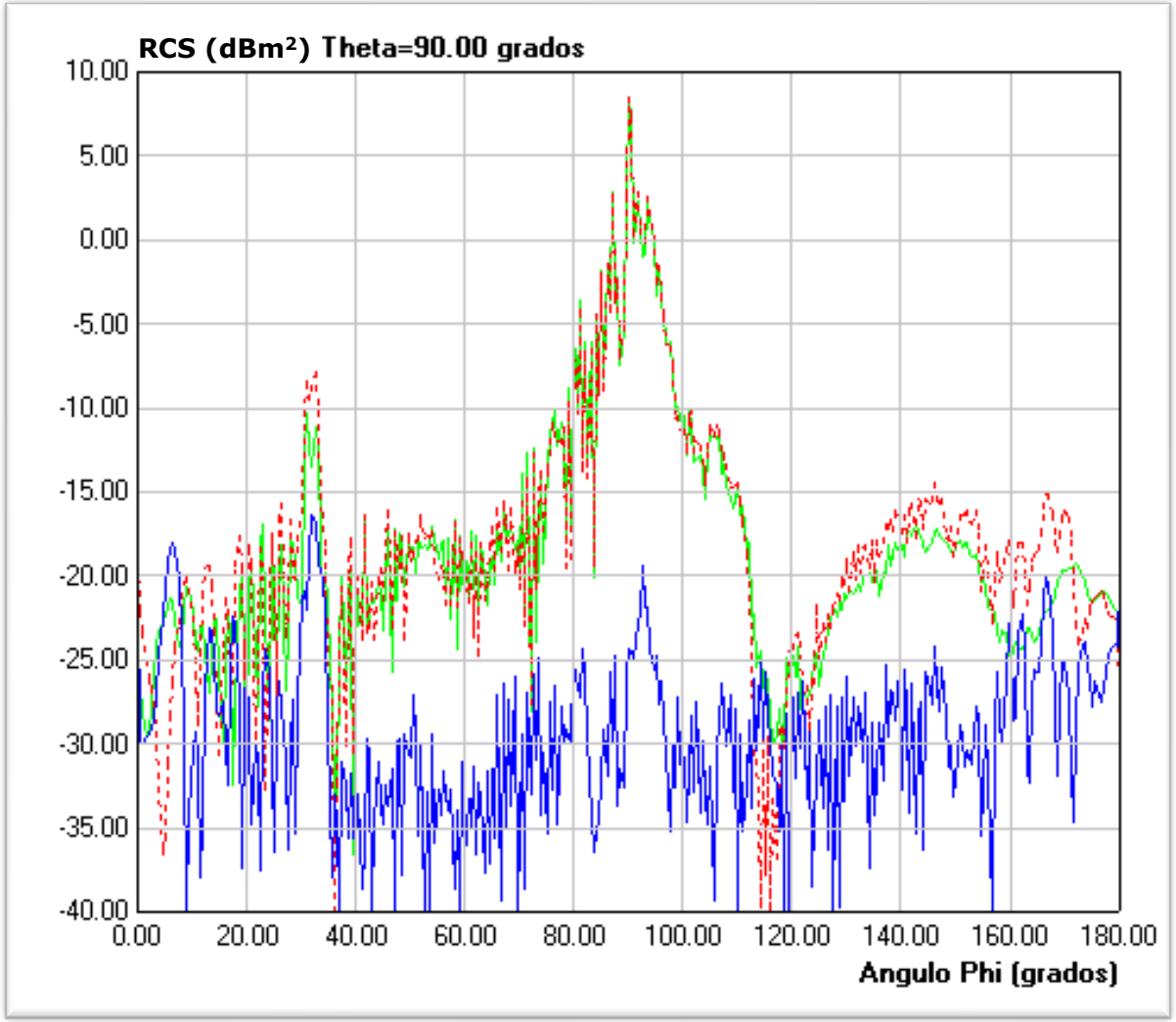
Diedro 98 grados (R+D+R²) – Corte θ=90º



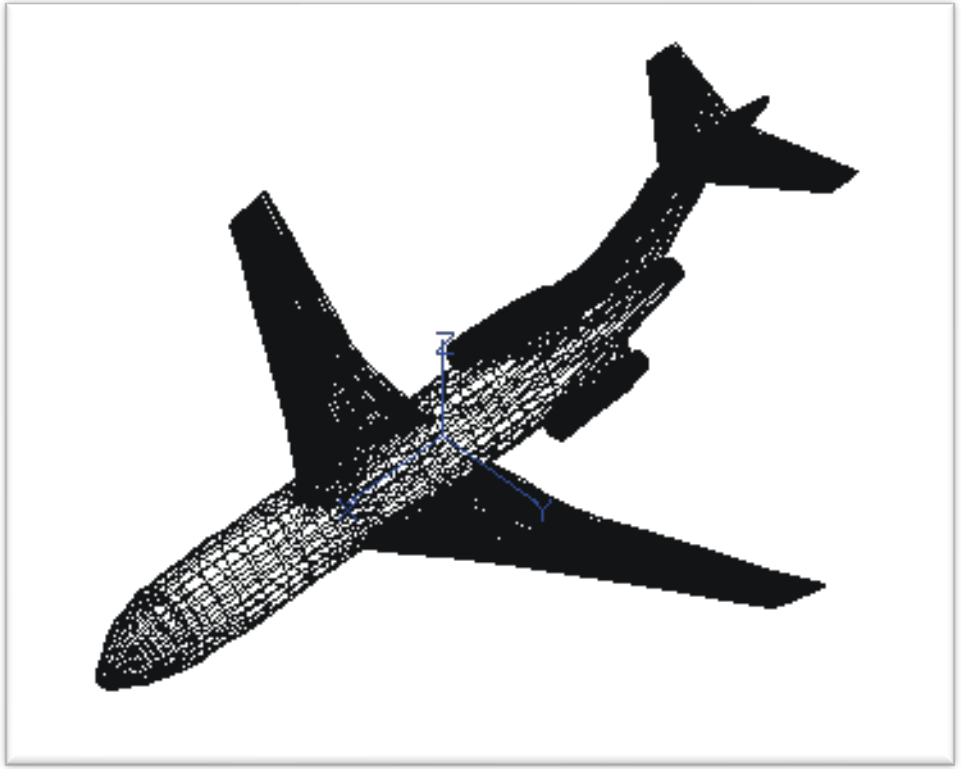


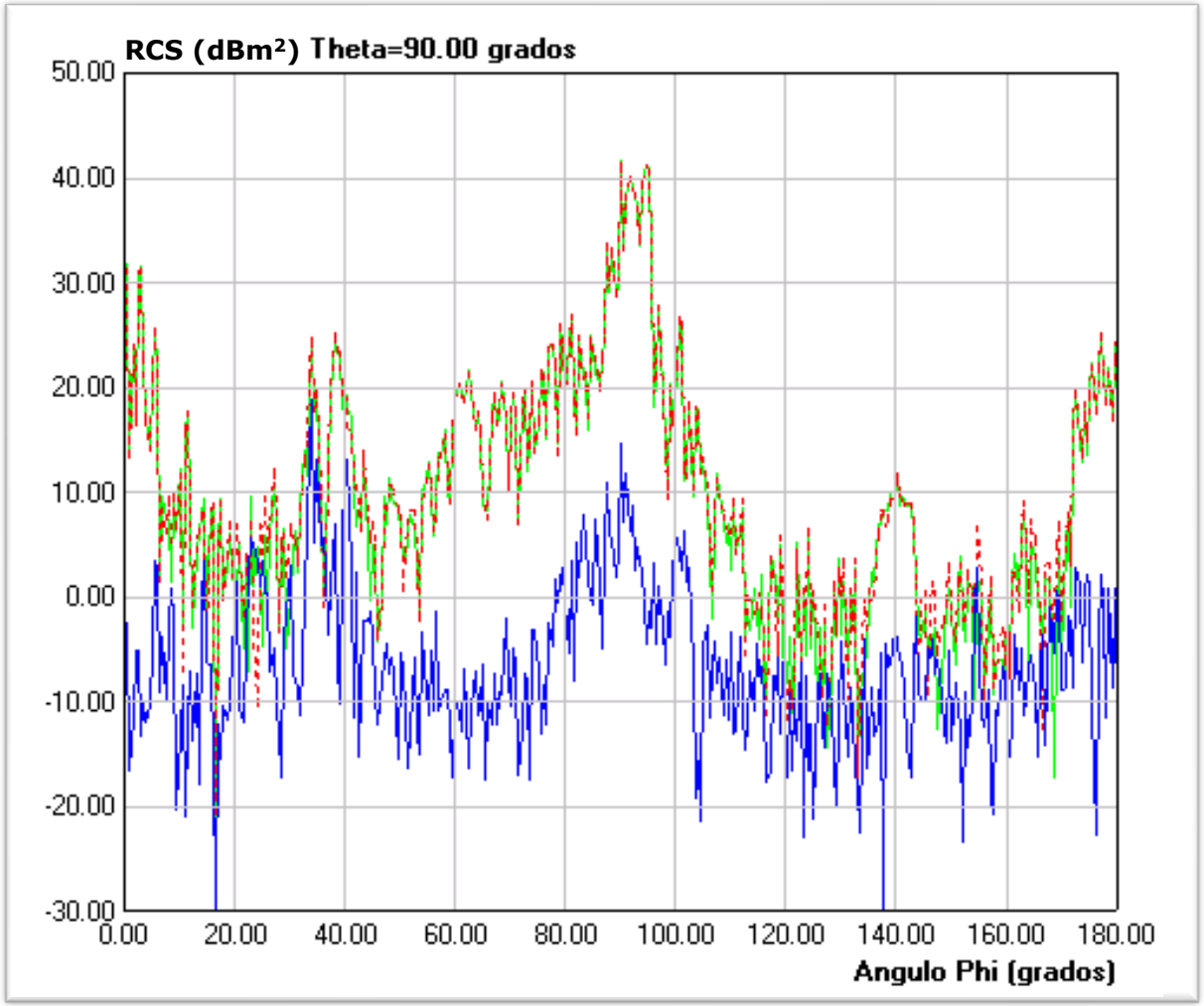
Misil (R+D+RD)



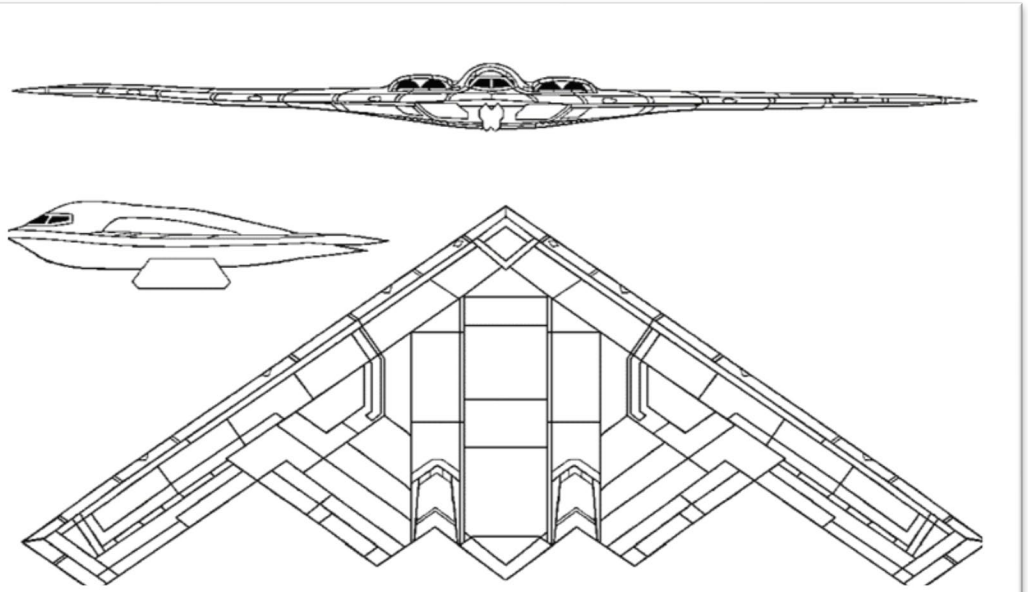

RCS (dBm²) Theta=90.00 grados
10.00
5.00
0.00
-5.00
-10.00
-15.00
-20.00
-25.00
-30.00
-35.00
-40.00
0.00
20.00
40.00
60.00
80.00
100.00
120.00
140.00
160.00
180.00
Angulo Phi (grados)

Boeing (R+D)




RCS (dBm²) Theta=90.00 grados
50.00
40.00
30.00
20.00
10.00
0.00
-10.00
-20.00
-30.00
0.00
20.00
40.00
60.00
80.00
100.00
120.00
140.00
160.00
180.00
Angulo Phi (grados)

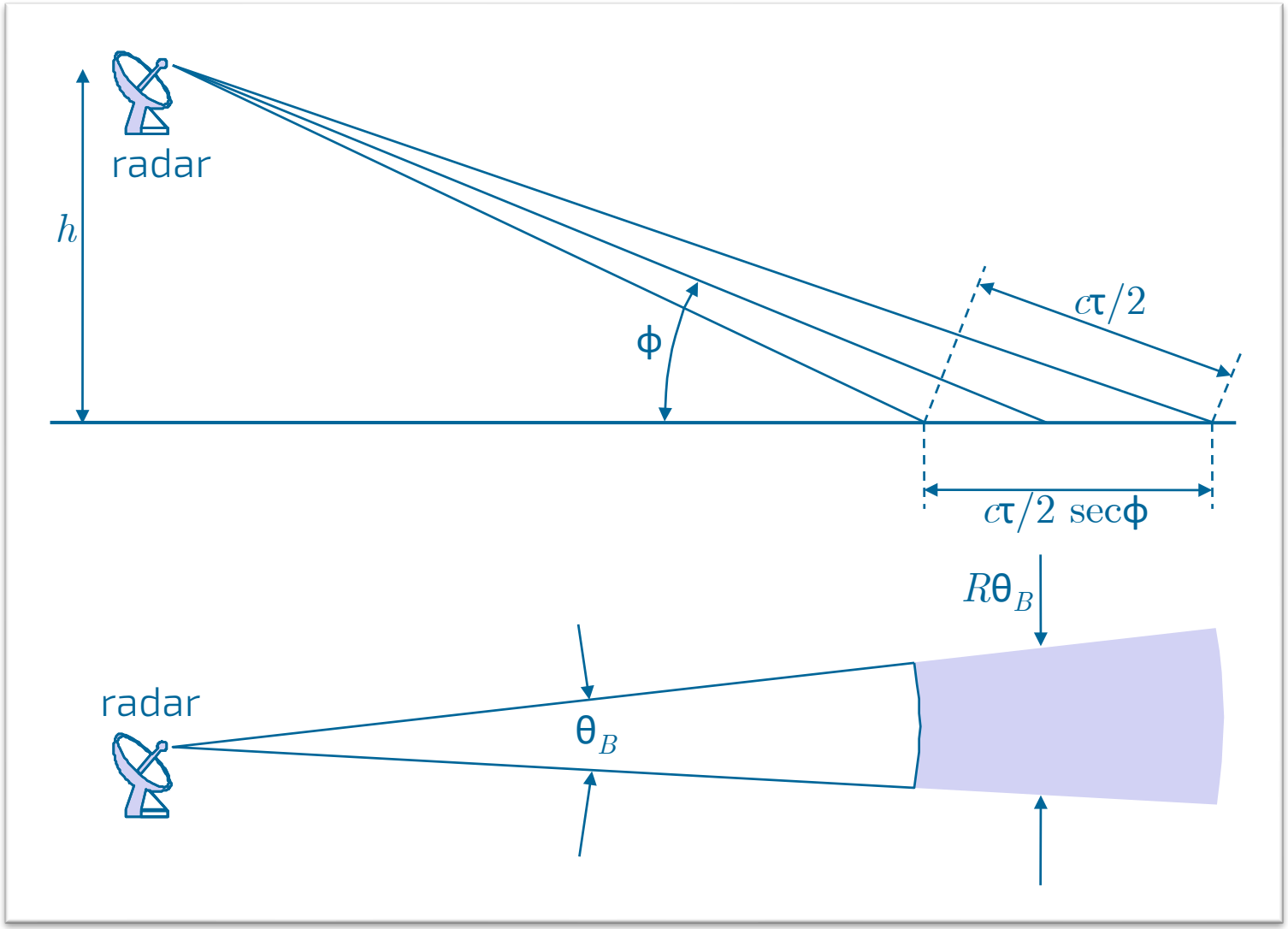
Blancos “invisibles” al radar. Tecnología stealth (I)



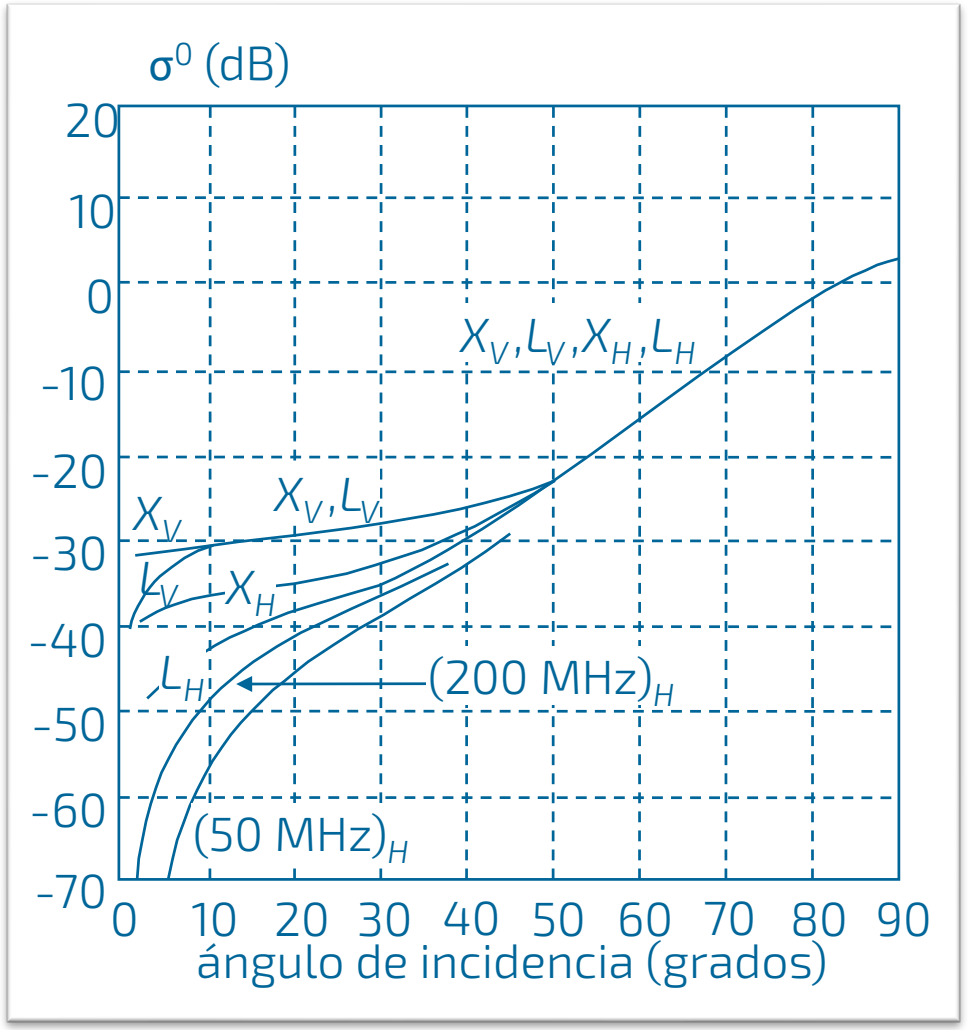
Blancos “invisibles” al radar. Tecnología stealth (II)

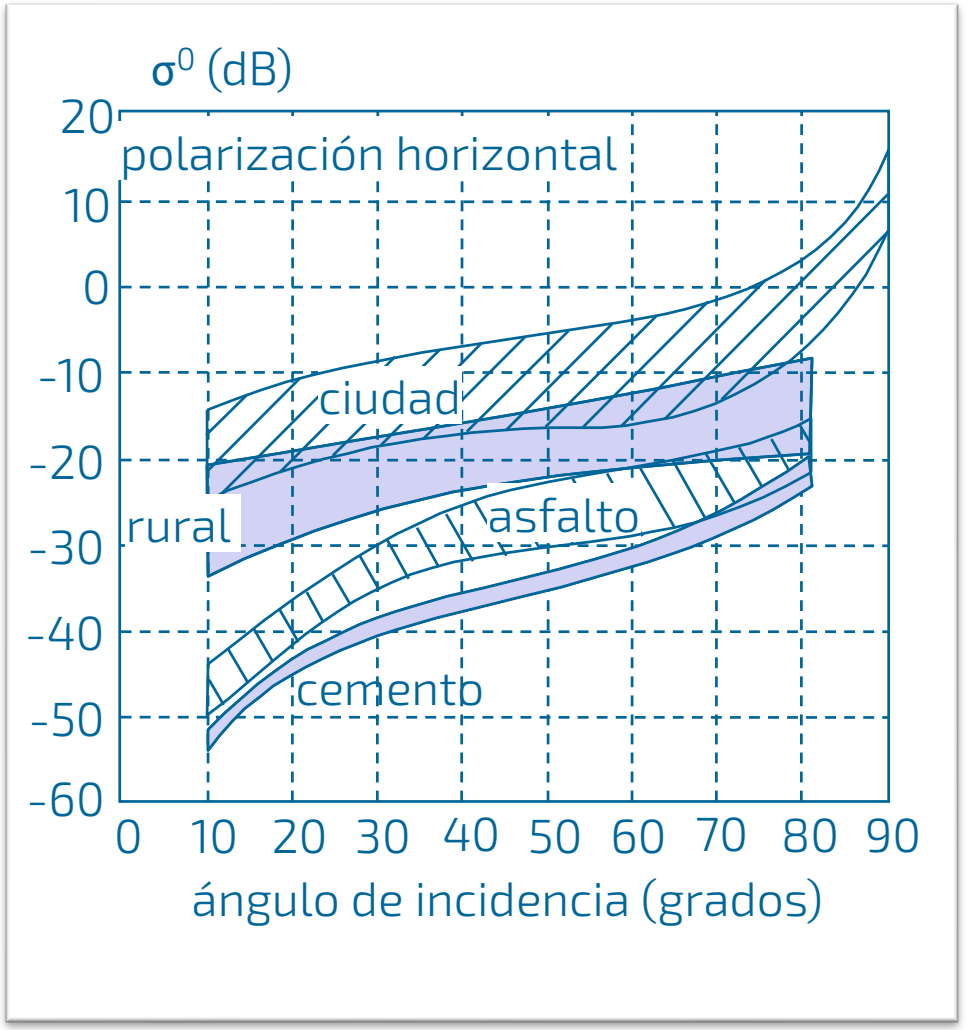
Blancos “invisibles” al radar. Tecnología stealth (III)

Densidad superficial de sección radar (I)



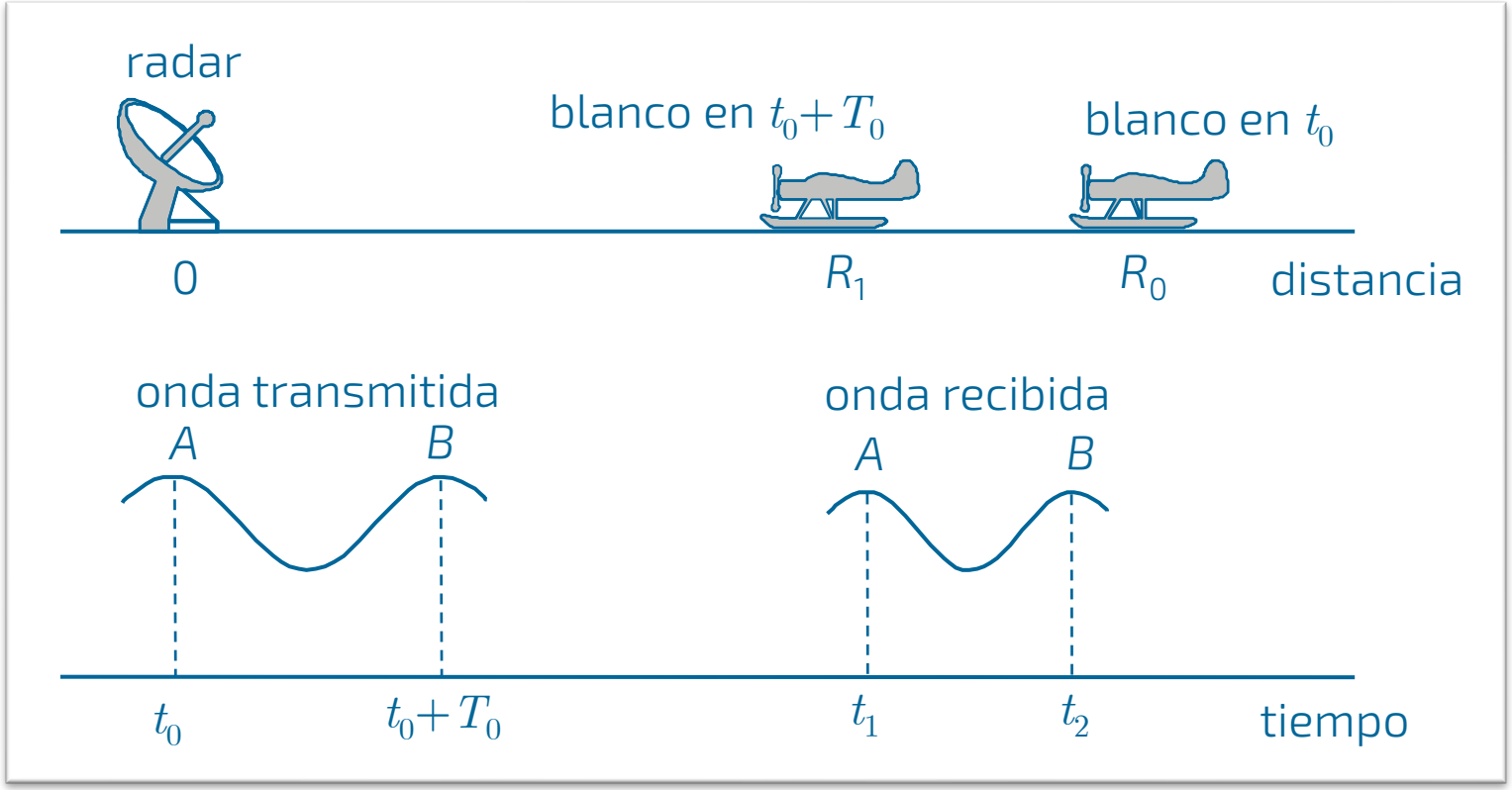
Densidad superficial de sección radar (II)



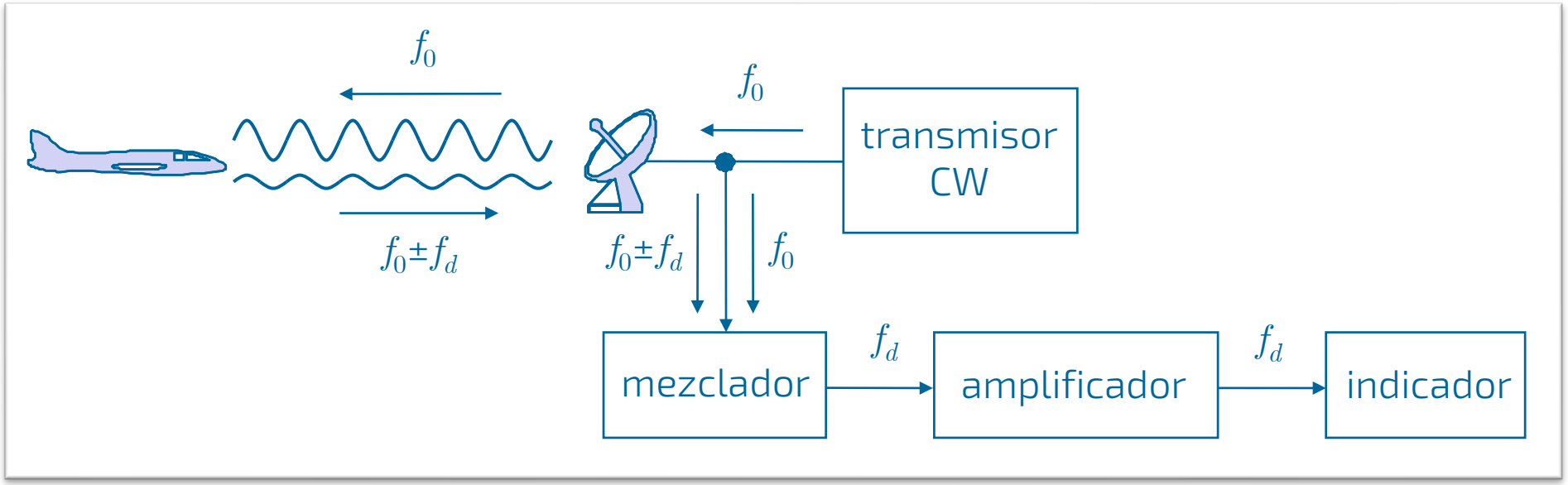


Radar de onda continua. Efecto doppler

- Desplazamiento en las frecuencias de las señales transmitida y recibida

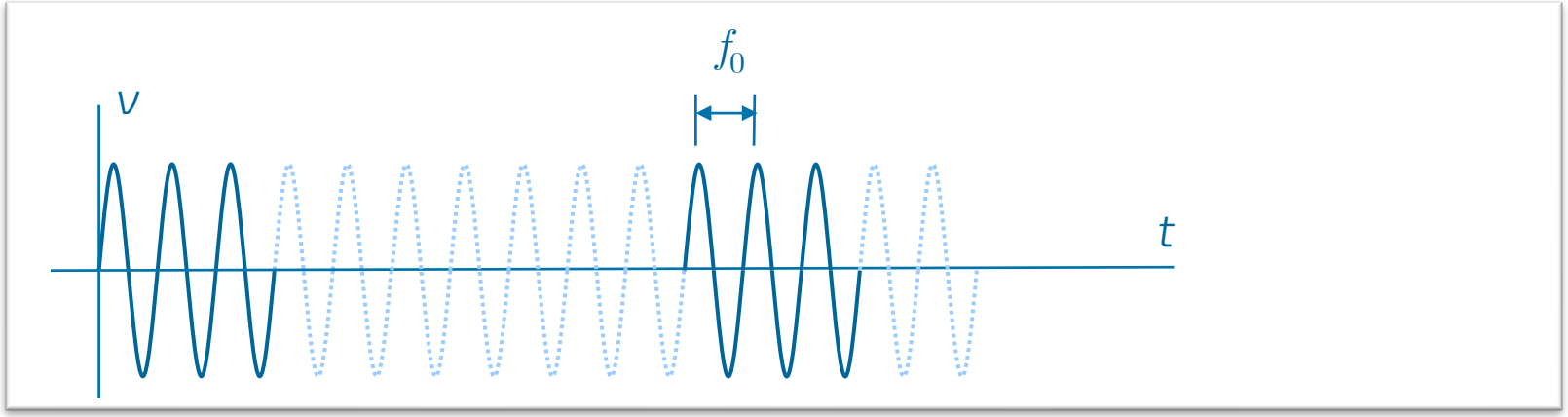


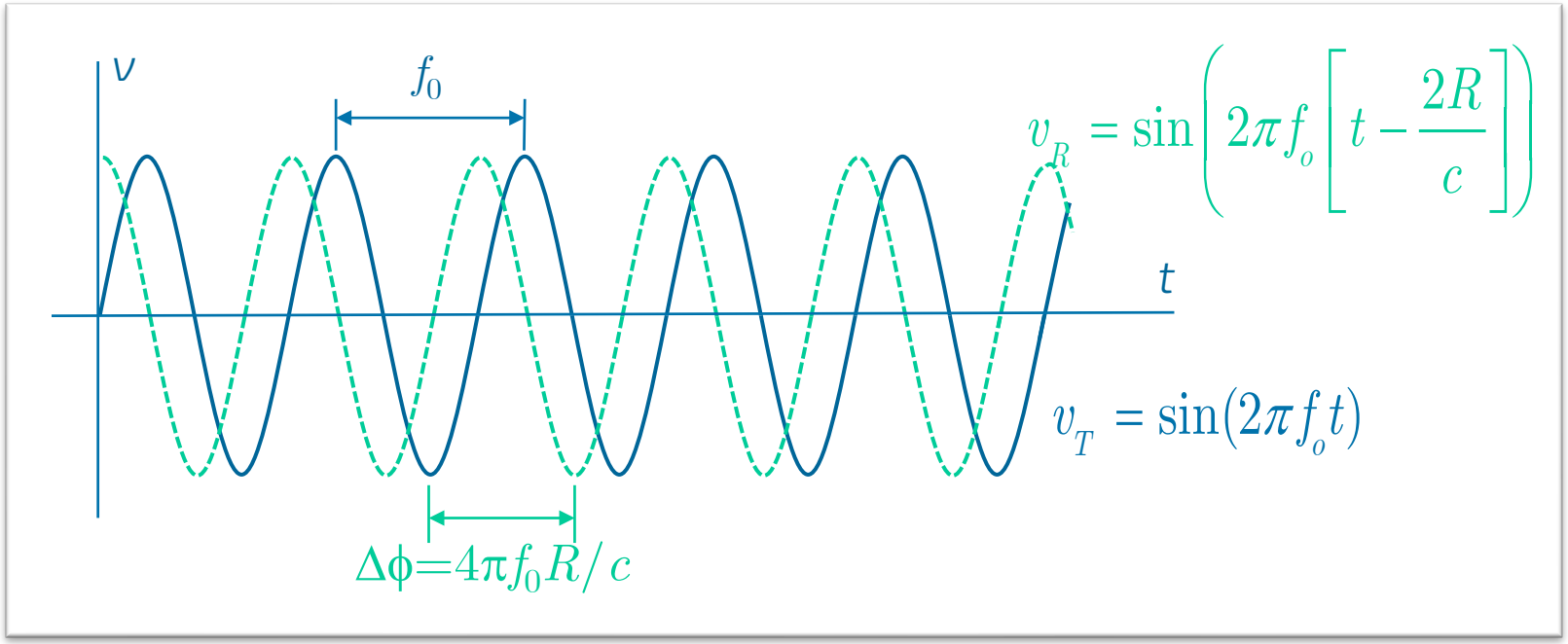
Receptor homodino



- Signo de la velocidad
- Frecuencias de corte del amplificador
- Aislamiento entre el transmisor y el receptor. Transmitiendo 1 kW debería haber un aislamiento de al menos 50 dB

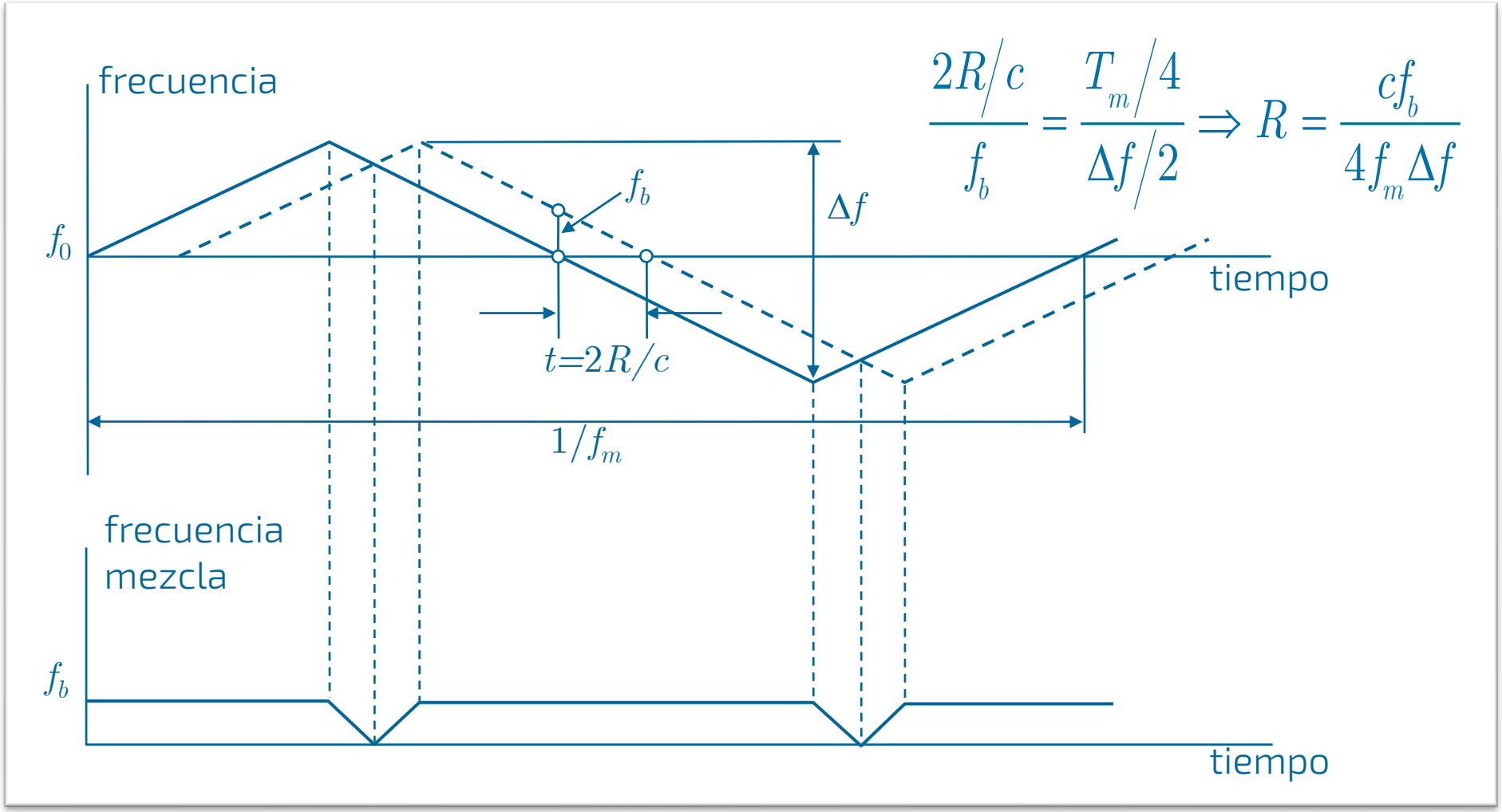
Radar de onda continua. Medida de distancias





Radar de onda continua. Modulación en frecuencia triangular (I)

- Sin desplazamiento doppler

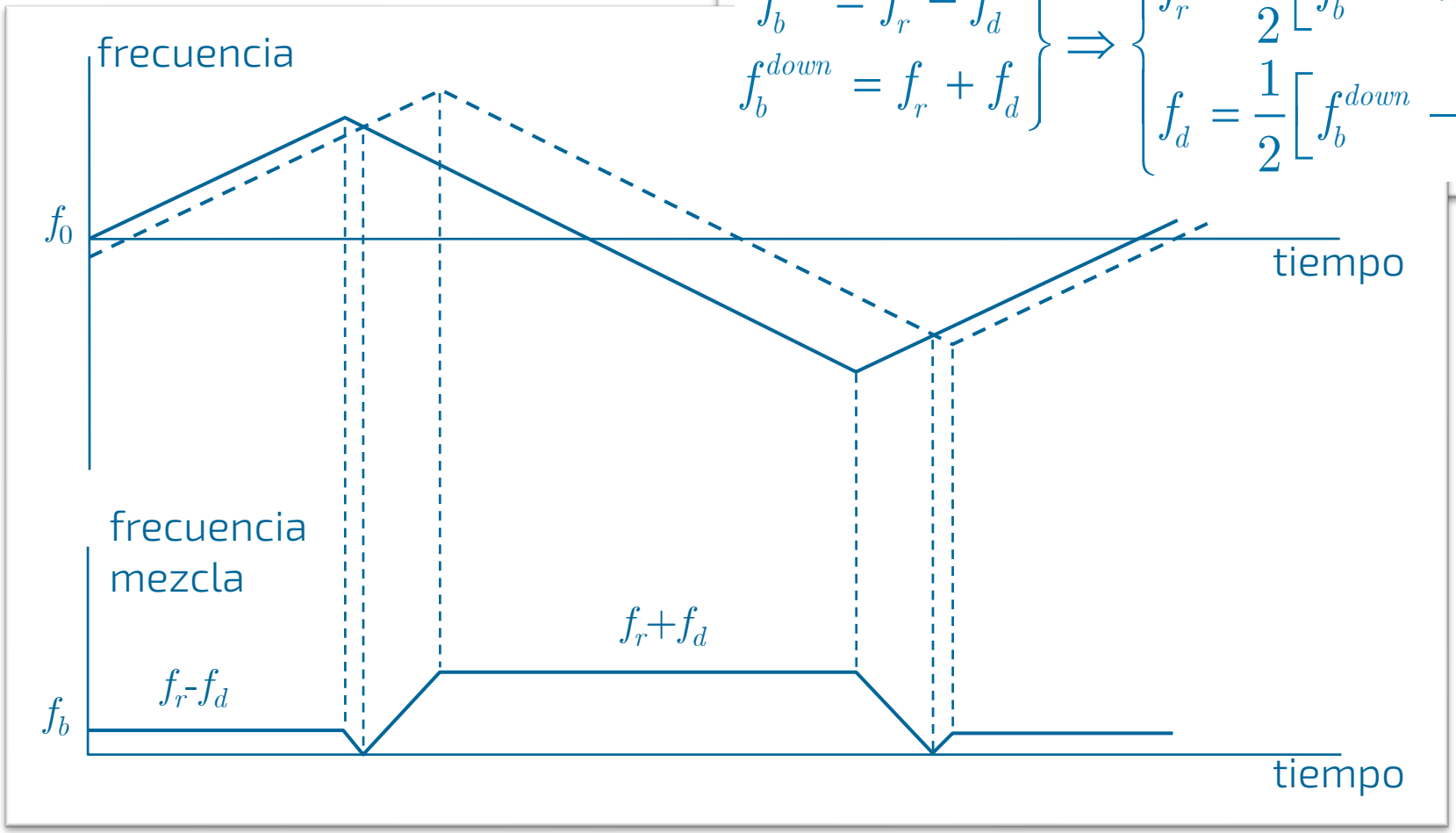


$$\frac{2R/c}{f_b} = \frac{T_m/4}{\Delta f/2} \Rightarrow R = \frac{cf_b}{4f_m\Delta f}$$

Radar de onda continua. Modulación en frecuencia triangular (II)

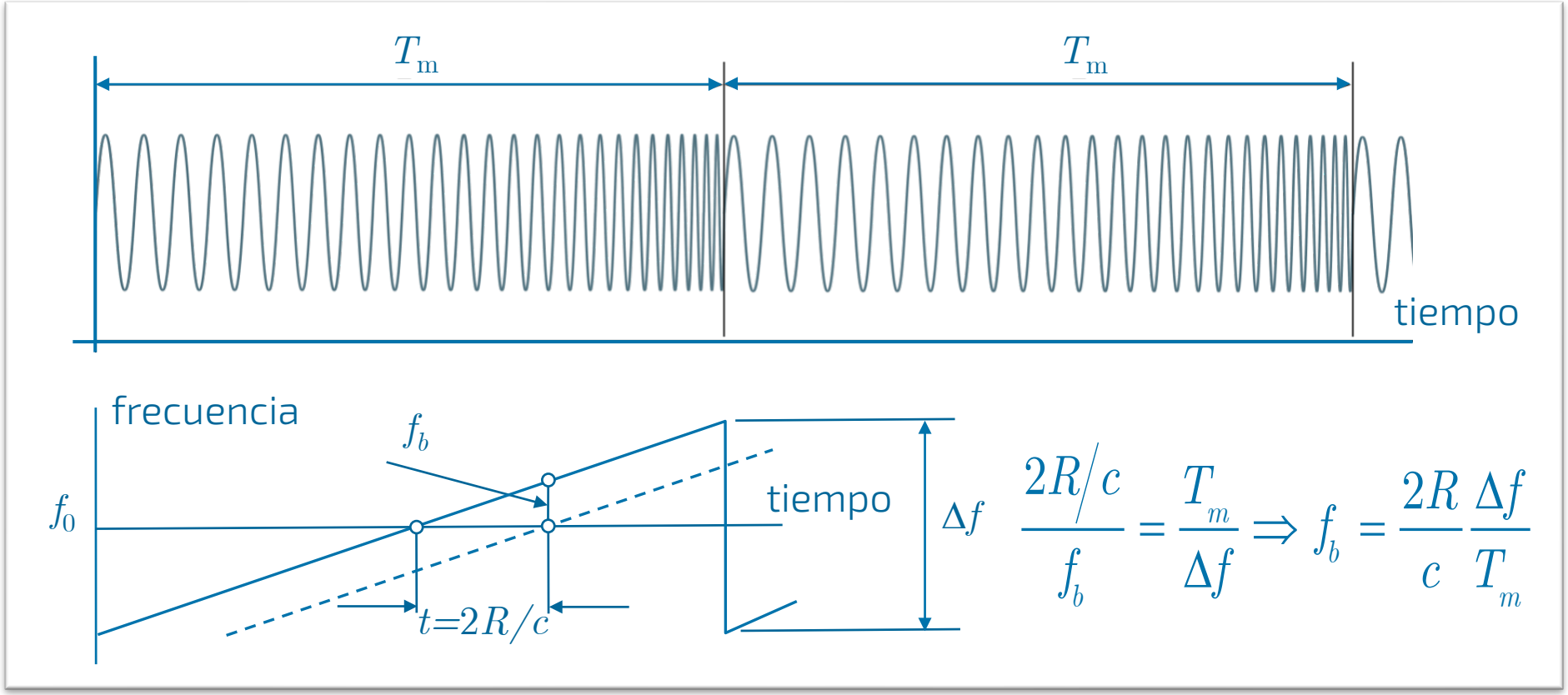
- Con desplazamiento doppler

$$\left.\begin{aligned} f_b^{up} &= f_r - f_d \\ f_b^{down} &= f_r + f_d \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{cases} f_r = \dfrac{1}{2}\left[f_b^{down} + f_b^{up} \right] \\ f_d = \dfrac{1}{2}\left[f_b^{down} - f_b^{up} \right] \end{cases}$$



Radar de onda continua. Modulación en diente de sierra

– Sin desplazamiento doppler

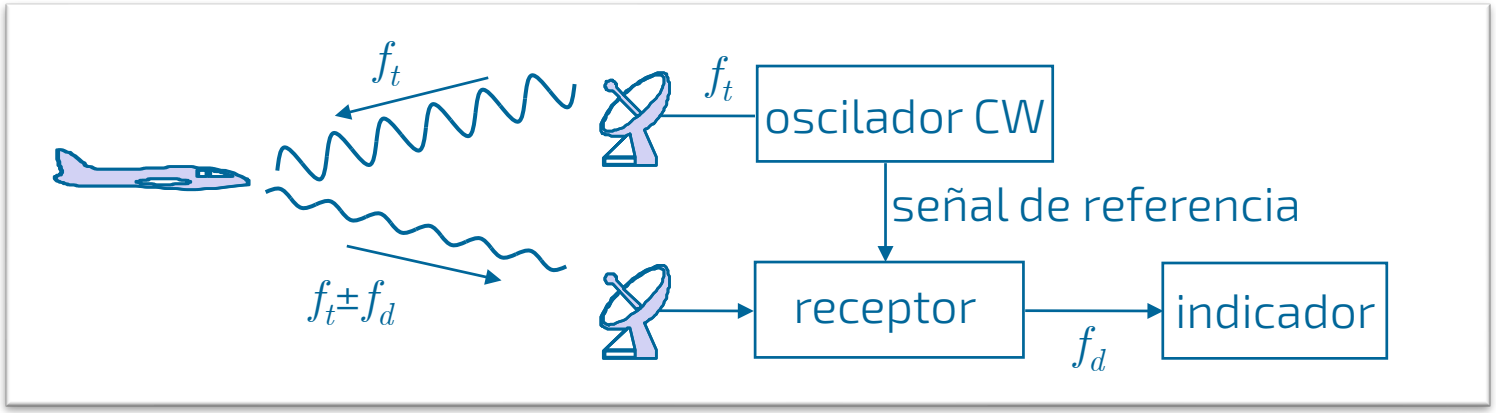


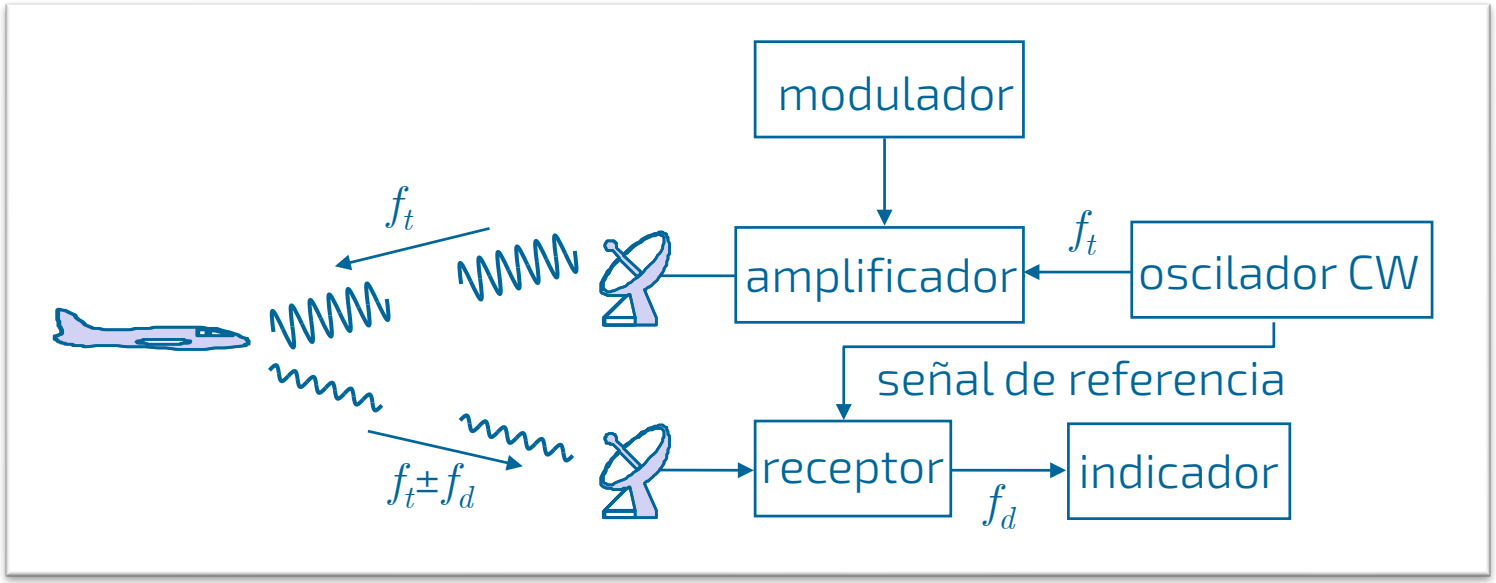
$$\frac{2R/c}{f_b} = \frac{T_m}{\Delta f} \Rightarrow f_b = \frac{2R}{c}\frac{\Delta f}{T_m}$$

$$f_{tx}(t) = f_0 - \frac{\Delta f}{2} + \frac{\Delta f}{T_m}t \quad ; \quad f_{rx}(t) = f_0 - \frac{\Delta f}{2} + \frac{\Delta f}{T_m}t + \frac{2R}{c}\frac{\Delta f}{T_m}$$

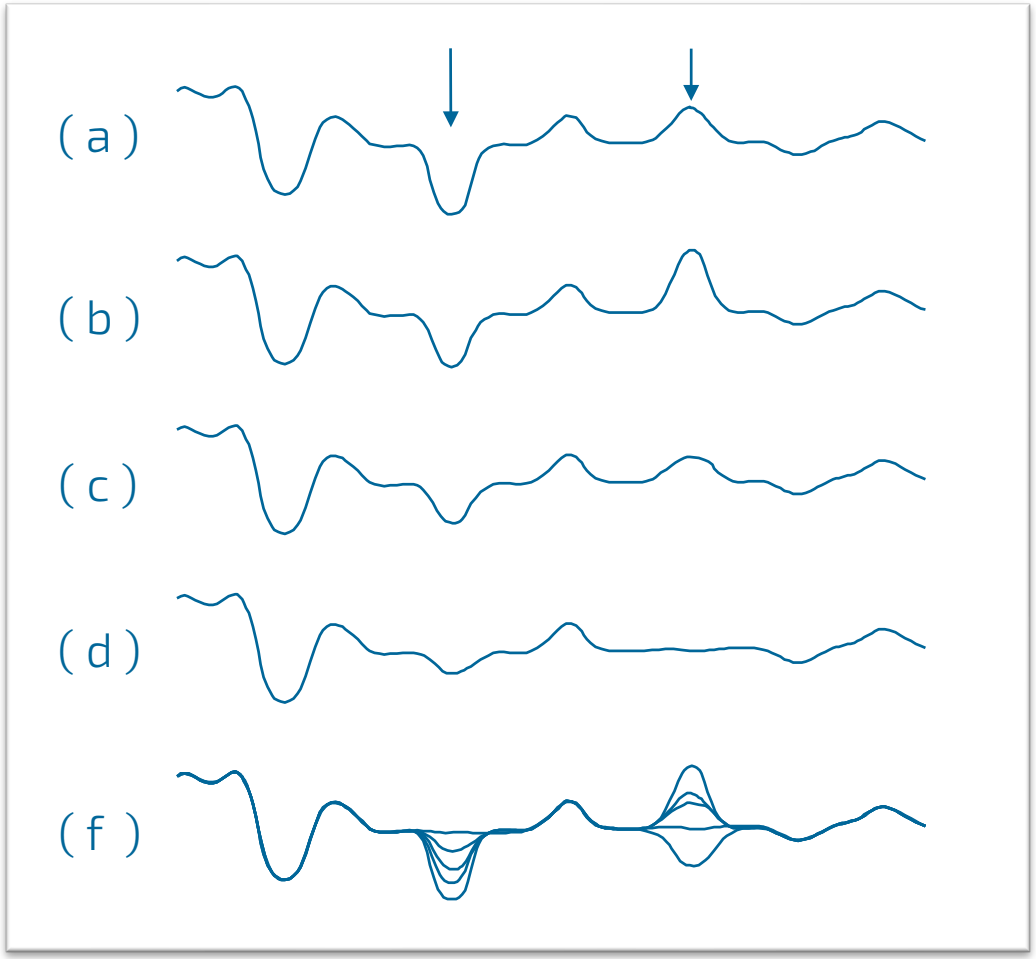
Medida de velocidades utilizando GPS

Indicador de blancos móviles (I)

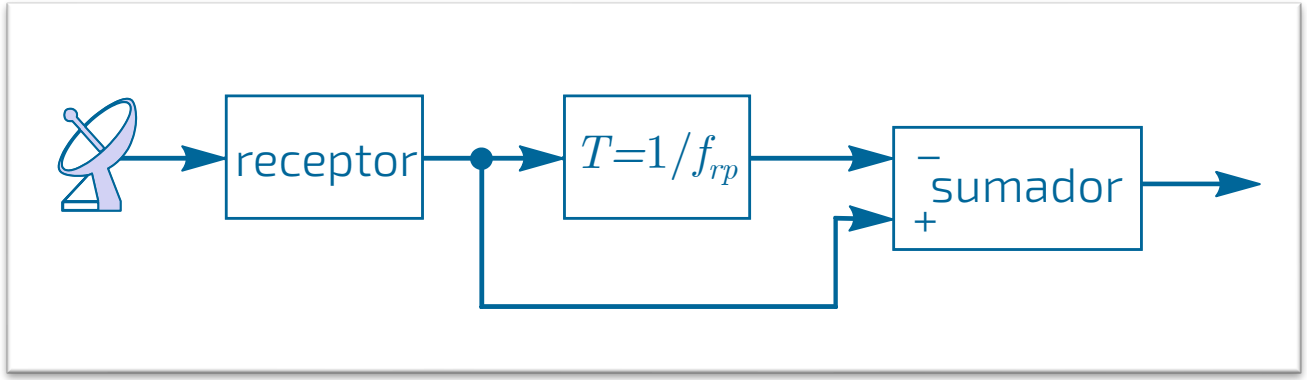




Indicador de blancos móviles (II)



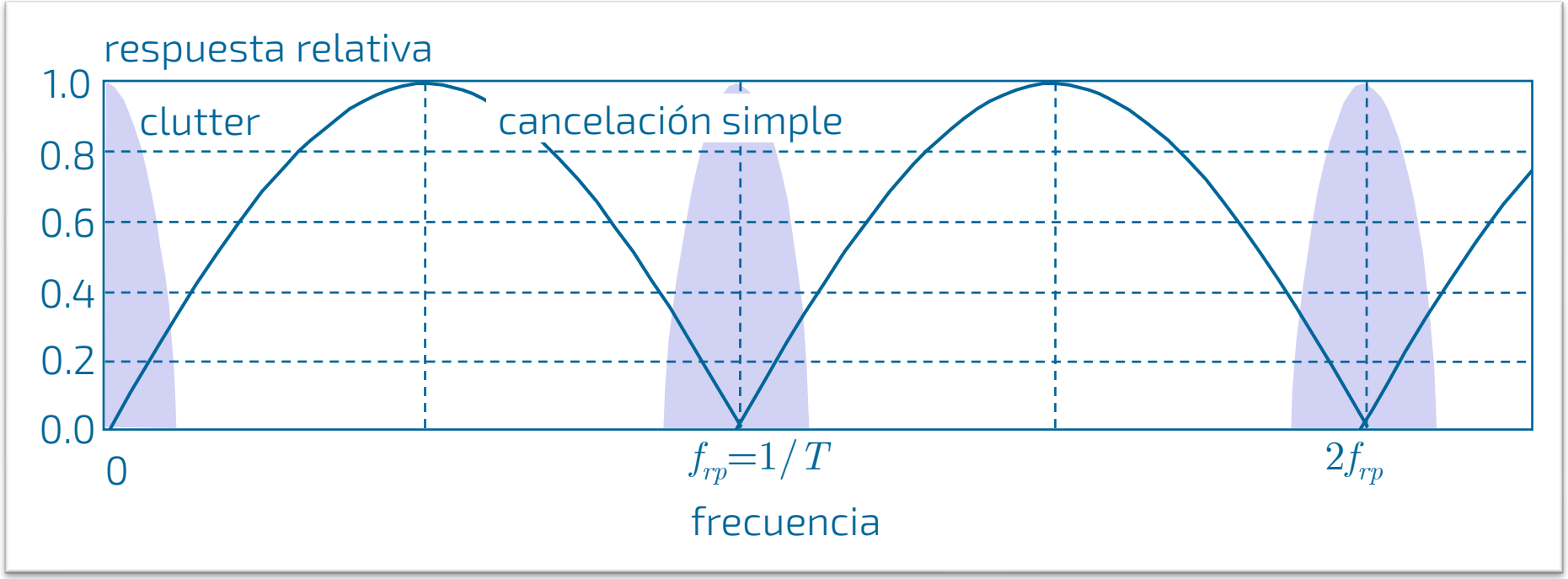
Cancelador simple (I)



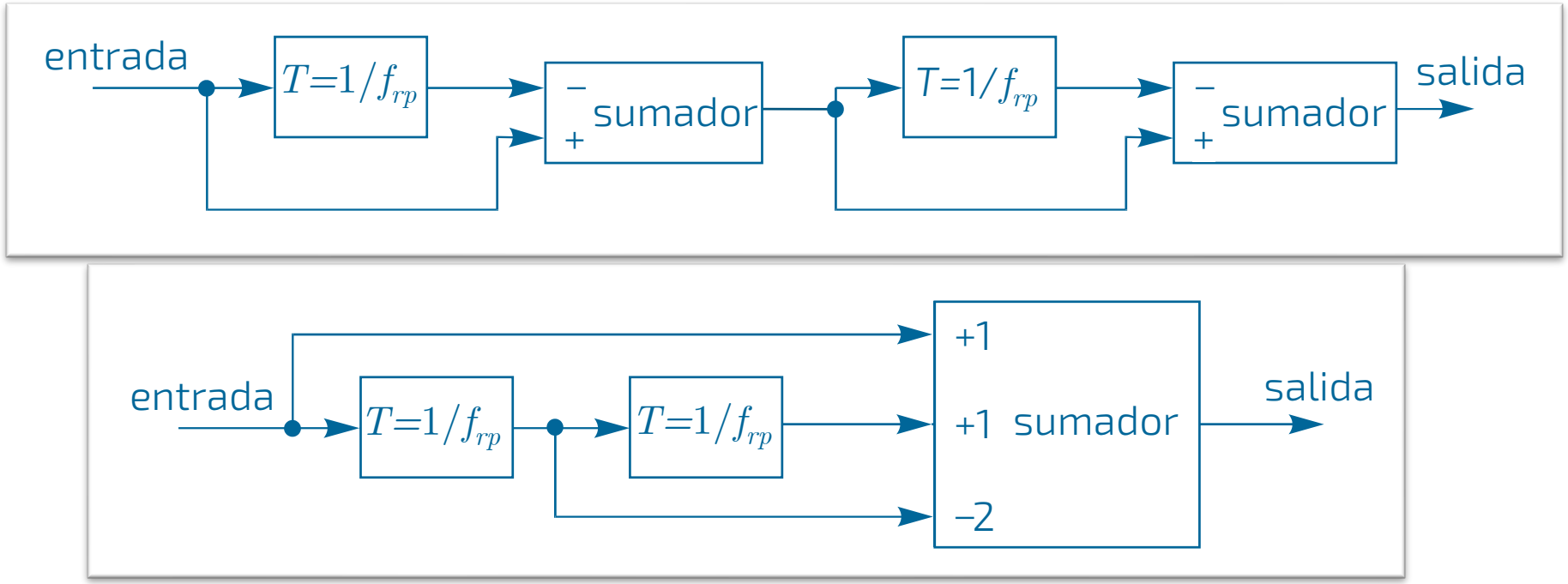
- Señal recibida: $v_1 = k\text{sen}\left(2\pi f_d t - \phi_0\right)$
- Señal recibida T segundos después: $v_2 = k\text{sen}\left[2\pi f_d\left(t - T\right) - \phi_0\right]$
- Diferencia: $v = v_1 - v_2 = 2k\text{sen}\left(\pi f_d T\right)\cos\left[2\pi f_d\left(t - \frac{T}{2}\right) - \phi_0\right]$

Cancelador simple (II)

- Respuesta en frecuencia: $f_d = \frac{n}{T} = nf_{rp}$; $n = 0, 1, 2, \ldots$



Cancelador doble (I)



- Dos configuraciones

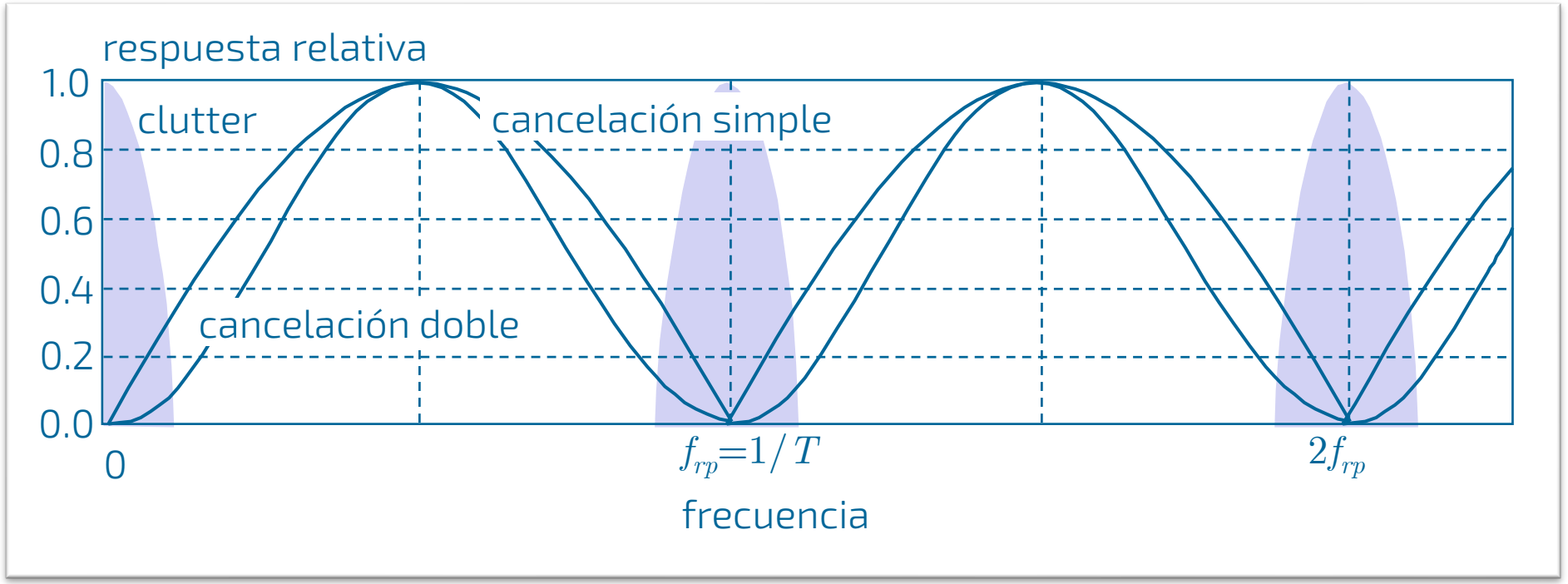
$$f(t)-f(t+T)$$

$$f(t)-f(t+T)-\left[f(t+T)-f(t+2T)\right]=f(t)-2f(t+T)+f(t+2T)$$

$$f(t)-2f(t+T)+f(t+2T);\quad (1,-2,1)$$

Cancelador doble (II)

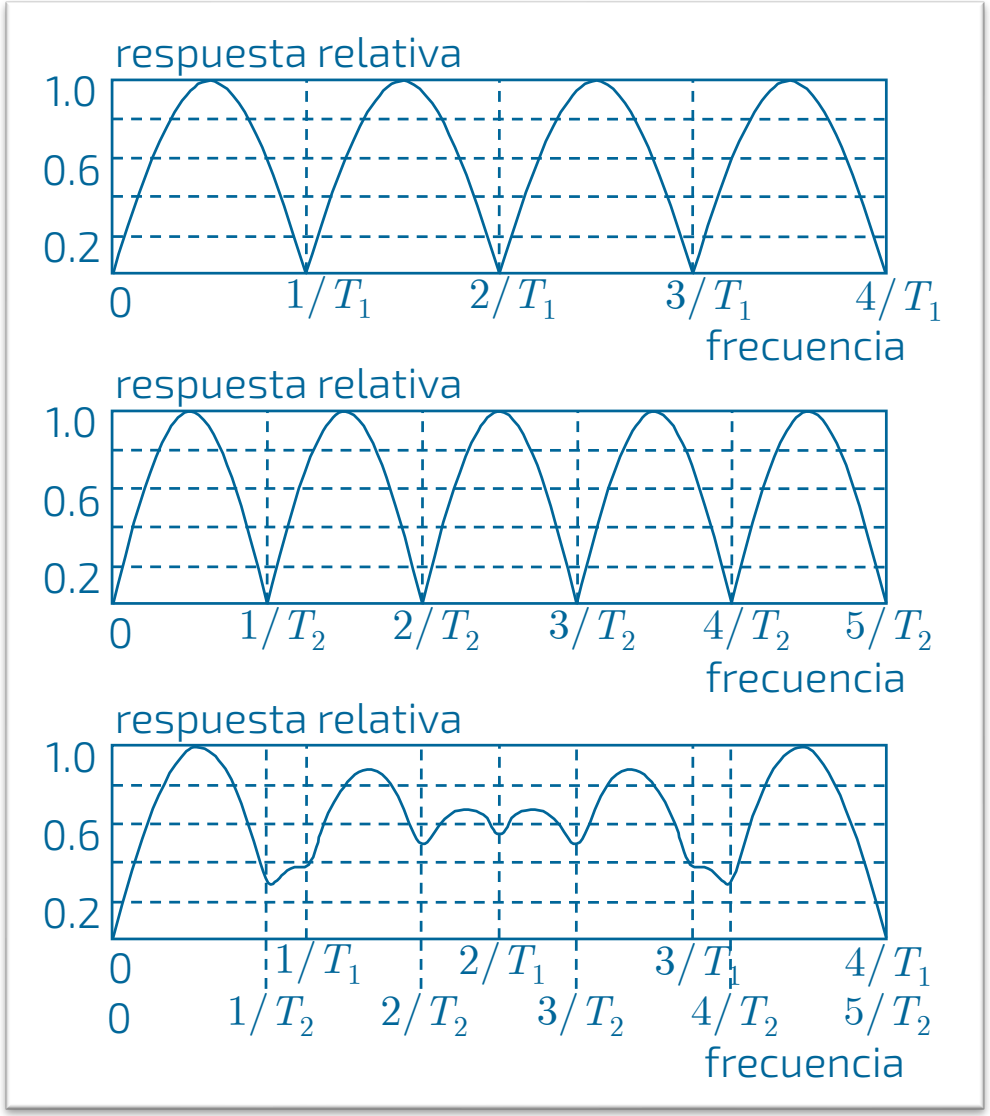
– Respuesta en frecuencia: $4\text{sen}^2\left(\pi f_d T\right)$



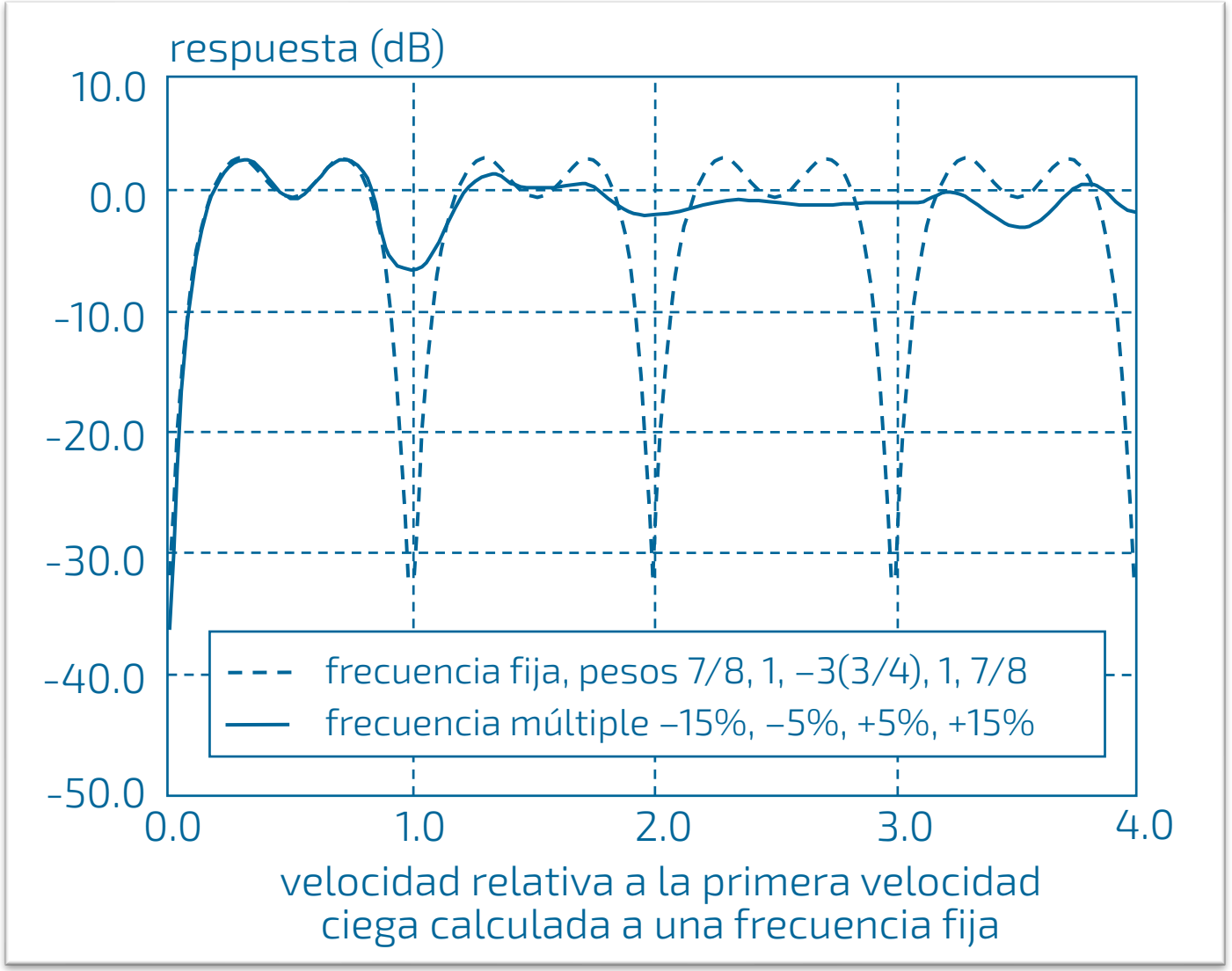
Técnicas de staggering (I)

$$\frac{n_1}{T_1} = \frac{n_2}{T_2} = \ldots = \frac{n_N}{T_N}$$

$$\frac{v_1}{v_B} = \frac{\sum n_i}{N}$$



Técnicas de staggering (II)



Radar de seguimiento (I)

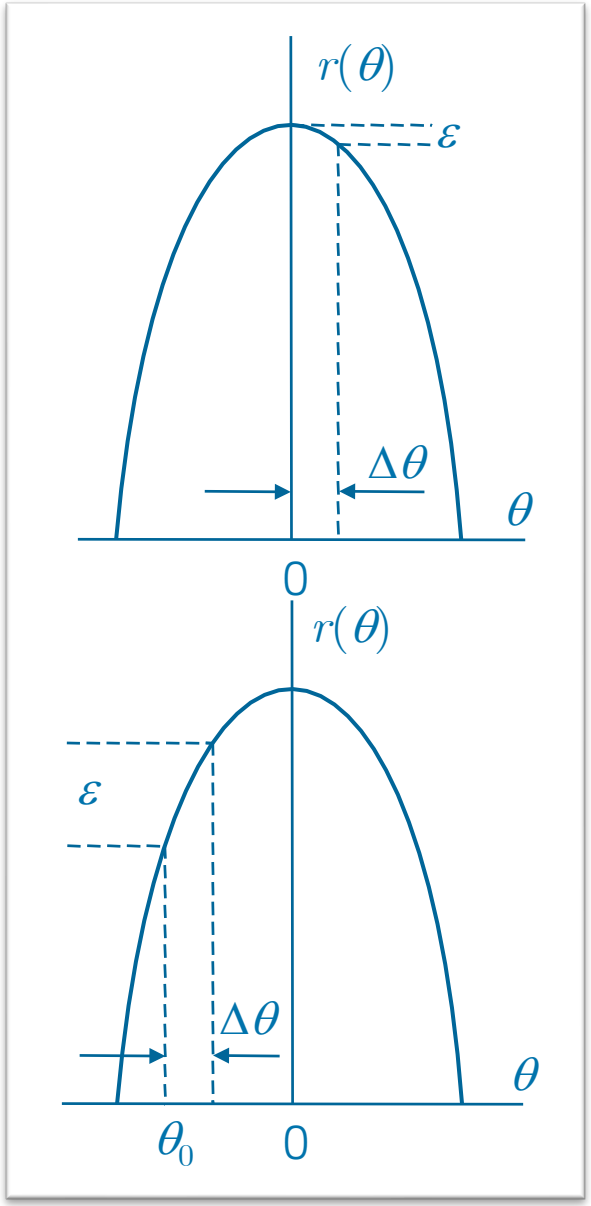
- Medida del error del apuntamiento

$$\varepsilon = r(\theta) - r(\Delta\theta) = C\left[G(\theta) - G(\Delta\theta)\right]$$

$$\frac{\varepsilon}{C} \approx G(\theta) - \left[G(\theta) + \left.\frac{dG(\Delta\theta)}{d\theta}\right|_{\theta=0} \Delta\theta + \left. + \frac{d^2G(\Delta\theta)}{d\theta^2}\right|_{\theta=0} (\Delta\theta)^2\right]$$

- Medida mejorada

$$\varepsilon = C\left[G(\theta_0) - G(\theta_0 + \Delta\theta)\right]$$
$$\varepsilon \approx -CG'(\theta_0)\Delta\theta$$

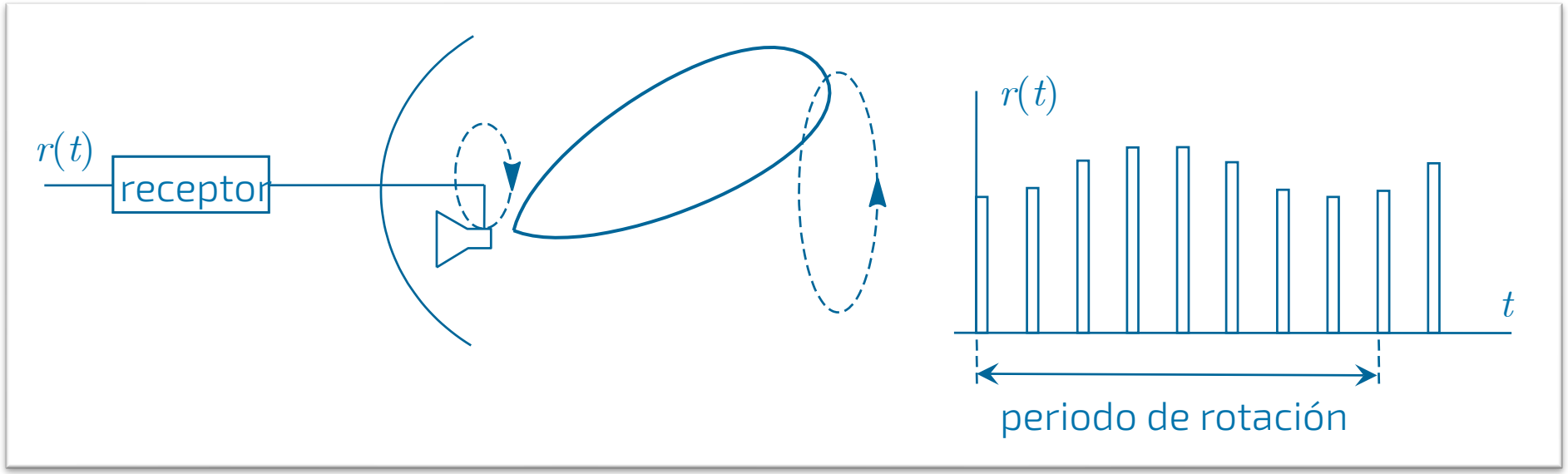


Radar de seguimiento (II)

- Pérdidas por descentramiento

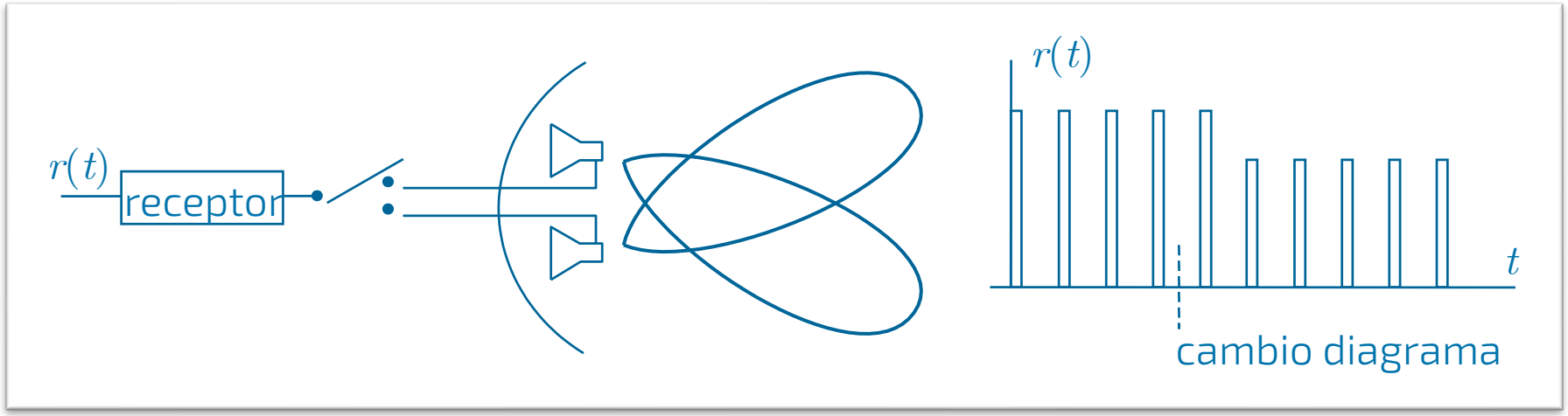
$$SNR_{\theta_0} = SNR_{\theta_0=0} \left| \frac{G(\theta_0)}{G(0)} \right|$$

- Formas de producir el descentramiento
  - Con una sola antena



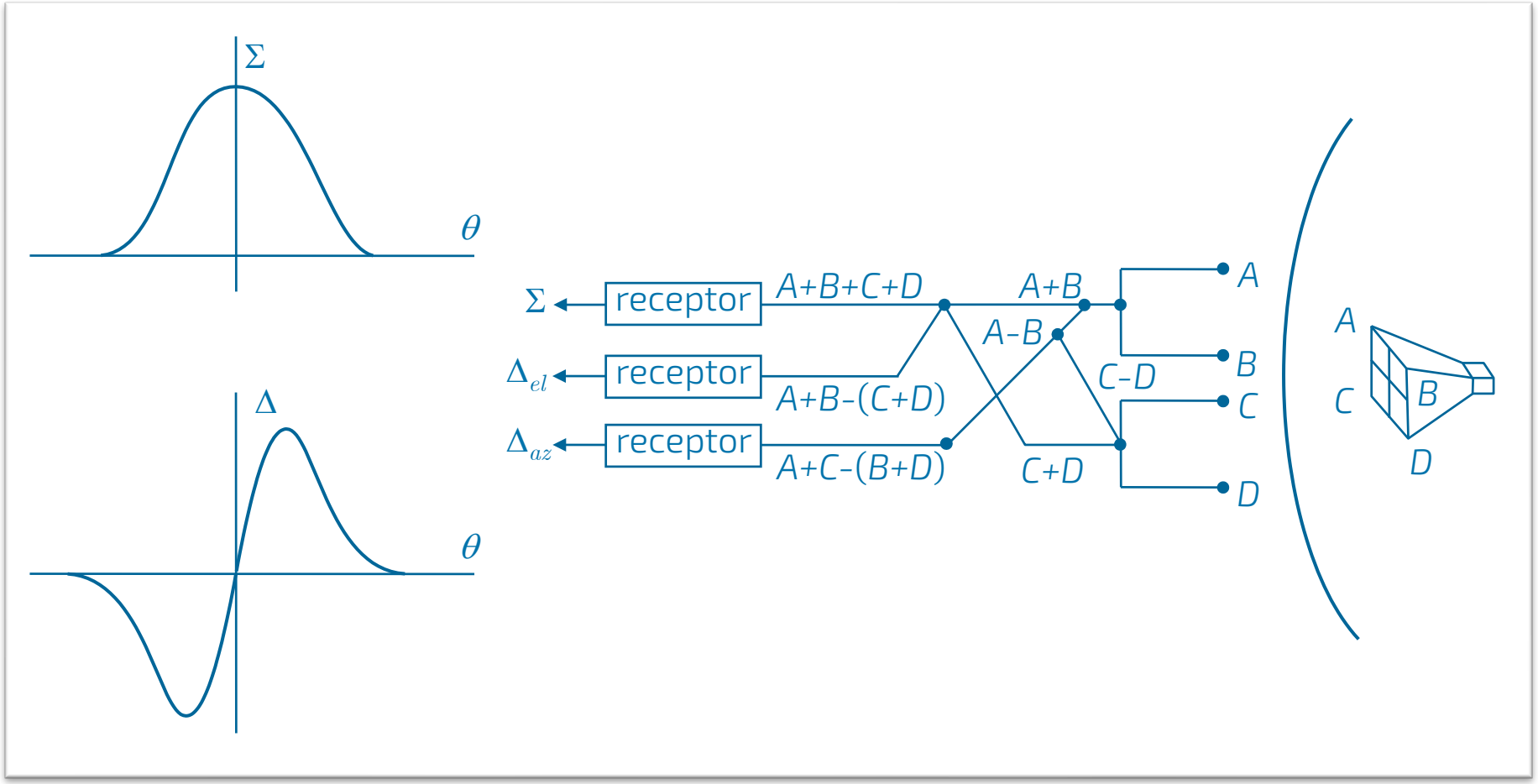
Radar de seguimiento (III)

- Con dos antenas



- Con cuatro antenas ⟹ Sistemas monopulso
  - Se forman nuevos haces con la suma y diferencia de los dos (o cuatro) originales

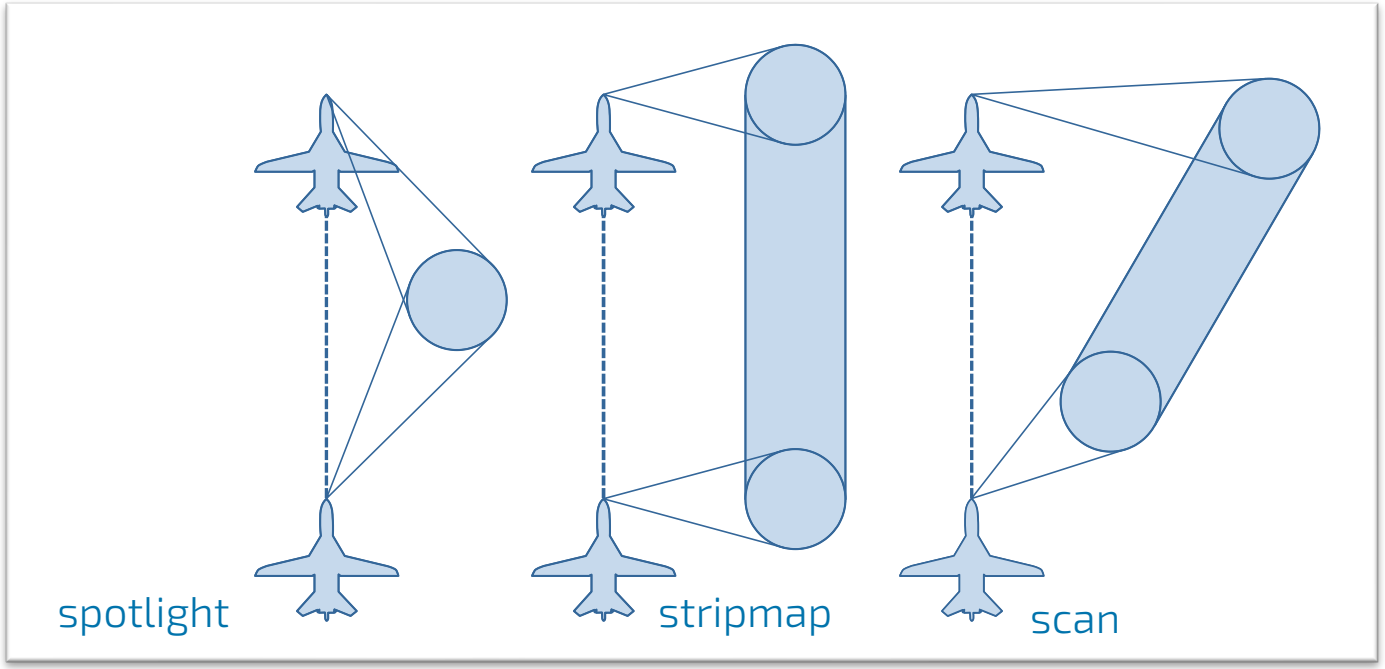
Radar de seguimiento (IV)



– Máxima ganancia del canal suma y mayor pendiente canal diferencia

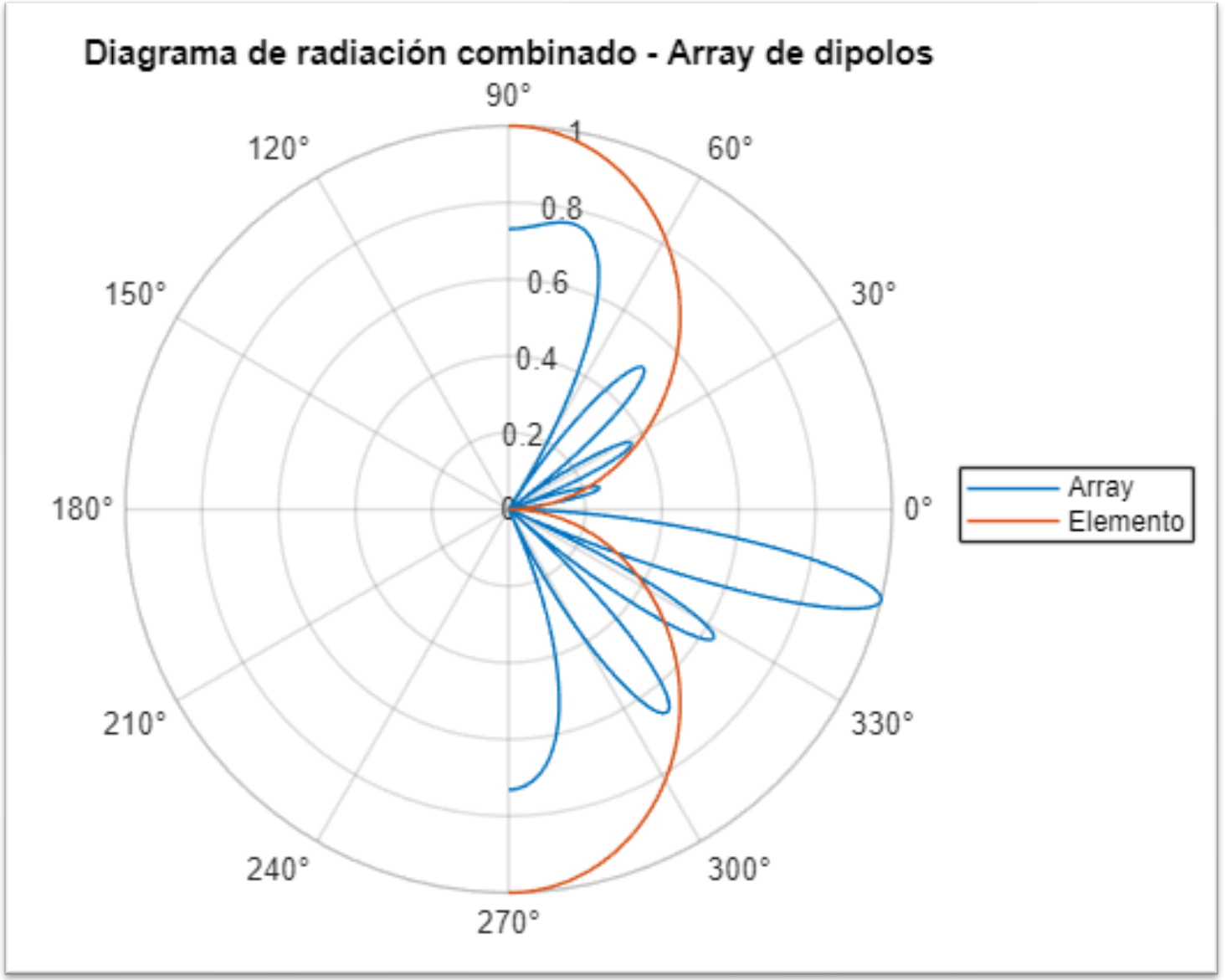
RADAR DE APERTURA SINTÉTICA

- Simulación del diagrama de radiación de un array lineal utilizando un solo elemento del array en movimiento
  - Se consigue una buena resolución en azimut sintetizando una gran apertura de antena
  - La resolución en distancia adecuada se puede conseguir de forma independiente mediante técnicas de compresión de pulsos

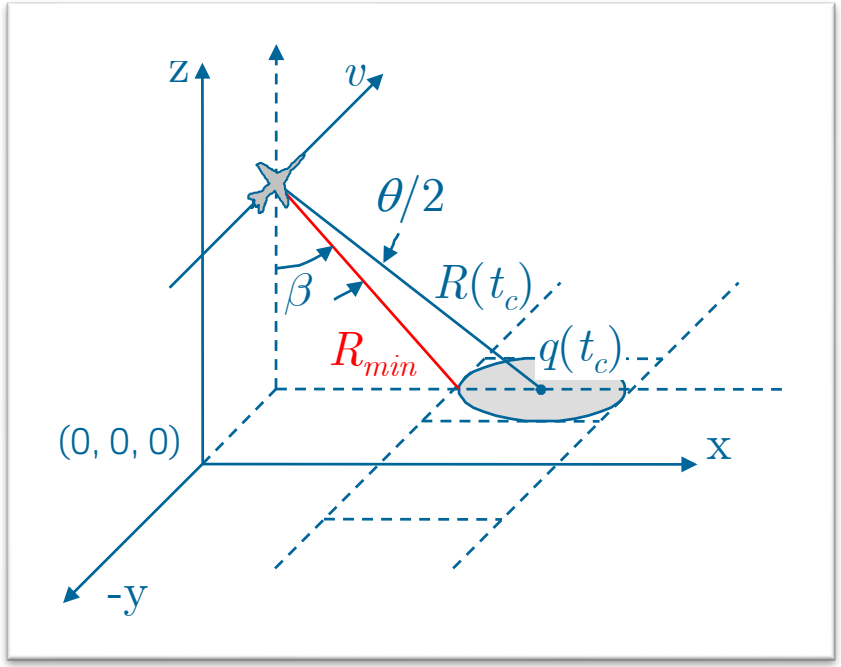


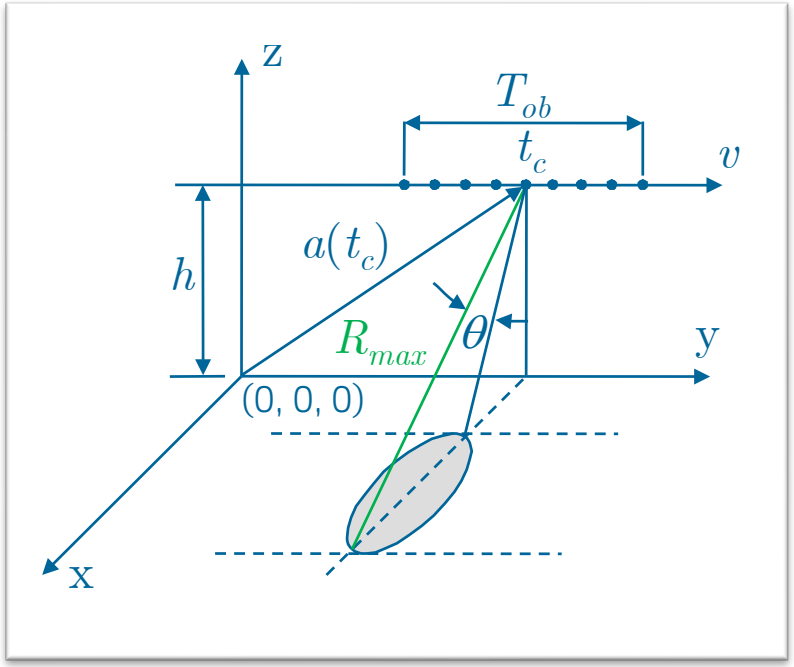
Array de antenas

- Ejemplo de array:
  - N = 8 (Número de elementos)
  - d = 0.5 λ (Espaciado entre elementos)
  - $\Delta\phi$ = 0.5 radianes (Diferencia de fase progresiva entre elementos)



Geometría de un sistema SAR de tipo strip (I)

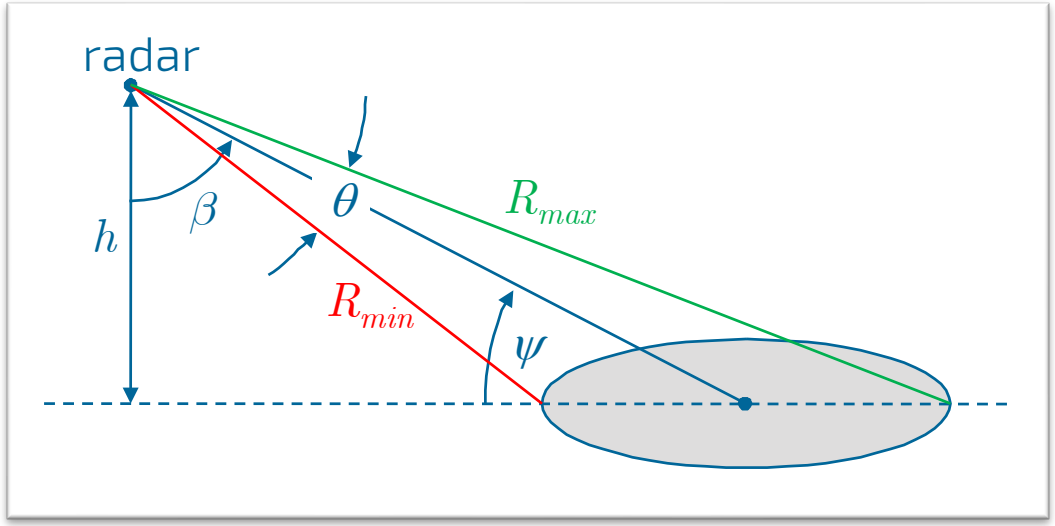




- T_{ob}: tiempo de observación
- t_c: posición del radar en cada instante de tiempo
- $a(t_c)$: vector de posición del radar respecto al origen
- h y v: altura y velocidad de vuelo (constantes)

Geometría de un sistema SAR de tipo strip (II)

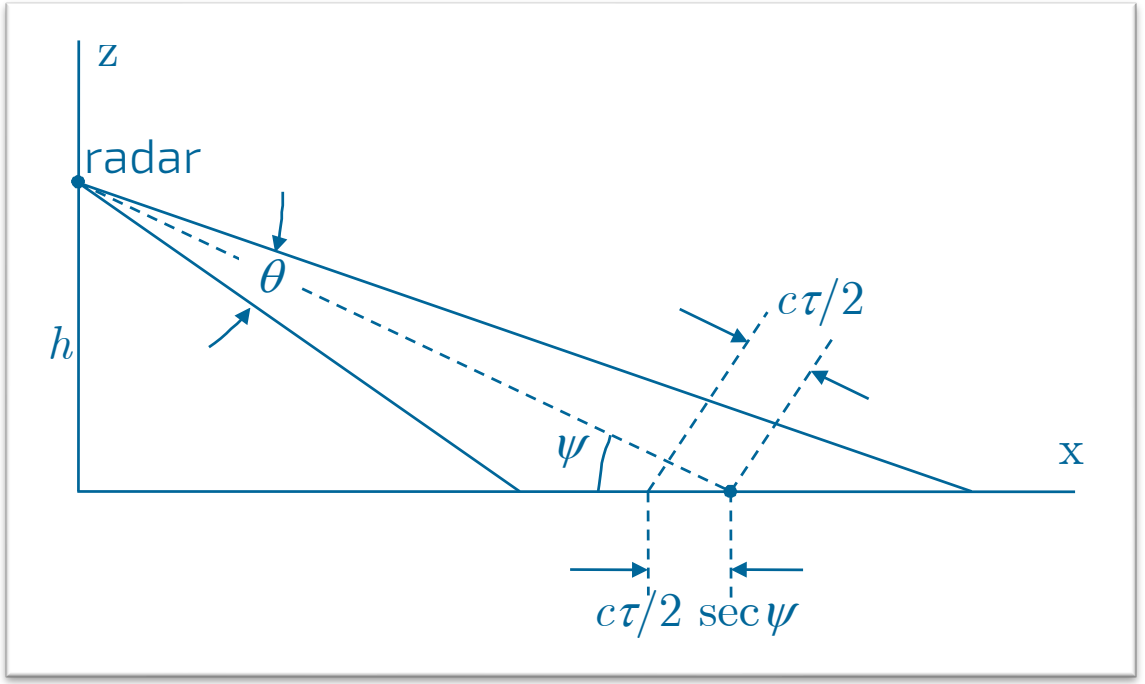
– Distancias mínima y máxima



$$R_{\min} = \frac{h}{\cos\left(\beta - \frac{\theta}{2}\right)}; \quad R_{\max} = \frac{h}{\cos\left(\beta + \frac{\theta}{2}\right)}; \quad R_{UNAMB} = R_{\max} - R_{\min}$$

Geometría de un sistema SAR de tipo strip (III)

- Celda de resolución en distancia



$$\Delta R = \frac{c\tau}{2}\sec\psi$$

- Sección radar recta

$$\sigma = \sigma^0\left(\Delta R\right)\left(\Delta A\right) = \sigma^0\left(\frac{c\tau}{2}\sec\psi\right)\left(\Delta A\right)$$

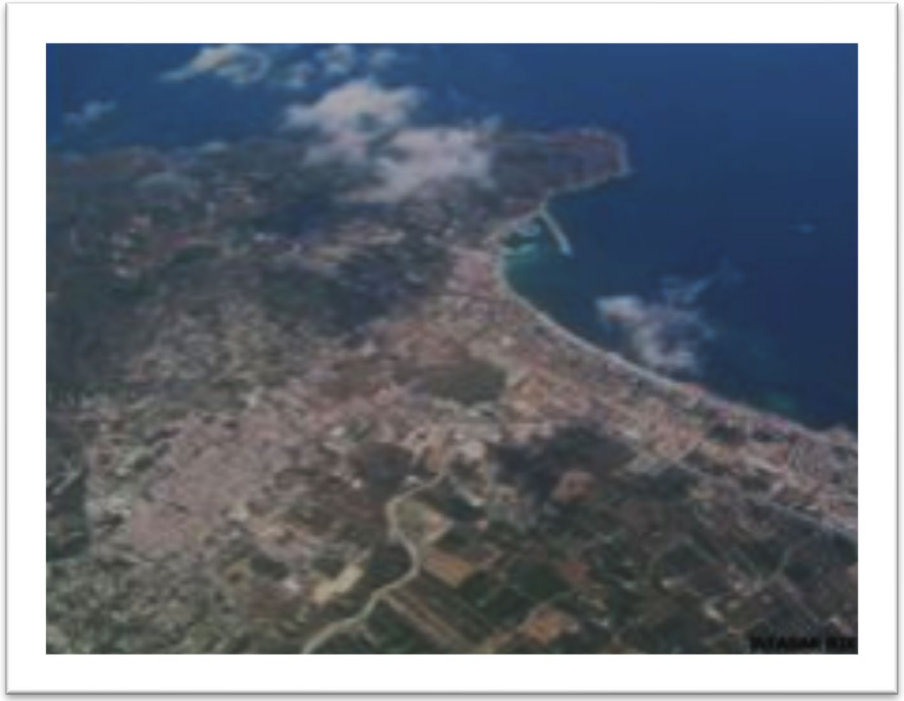
Ecuación radar SAR

$$SNR_n = \frac{P_{av} G^2 \lambda^3 \sigma_0}{(4\pi)^3 R^3 k T_0 L} \frac{\Delta R}{2v} c \sec\beta$$

- $P_{av} = P_t f_{rp} / B_n$: potencia promedio transmitida por el radar durante el tiempo de observación
- $n = T_{ob} f_{rp}$: integración de pulsos durante el tiempo de observación (depende inversamente de la celda de resolución en azimut)
- v : velocidad de vuelo
- β : separación con respecto al eje Z
- ΔR : resolución en distancia

Imágenes SAR: Ejemplo (I)

Imágenes SAR: Ejemplo (II)

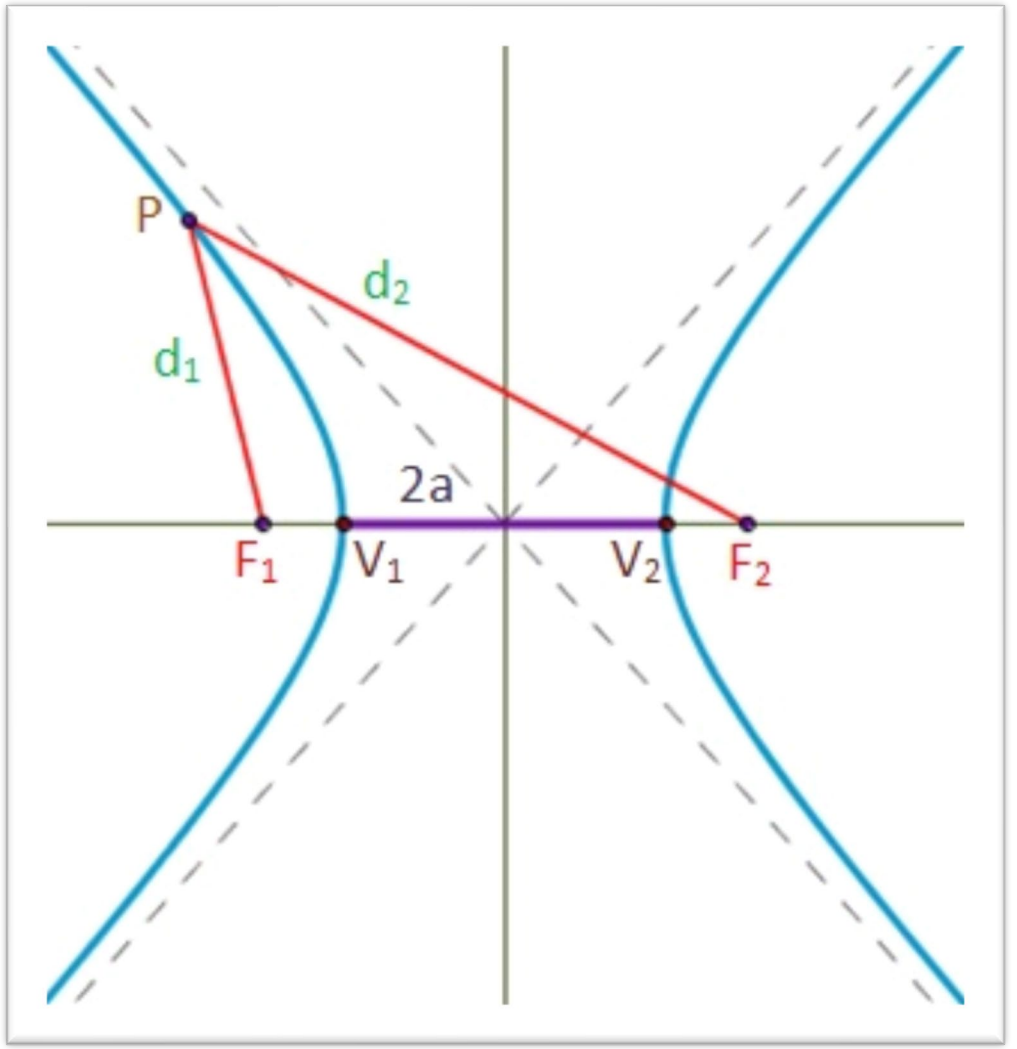


Sistemas de radionavegación

- Sistemas hiperbólicos navegación terrestre
  - Sistemas DECCA, LORAN y Omega
- Sistemas de navegación por satélite
  - Sistemas NAVSTAR-GPS, Galileo y GLONASS

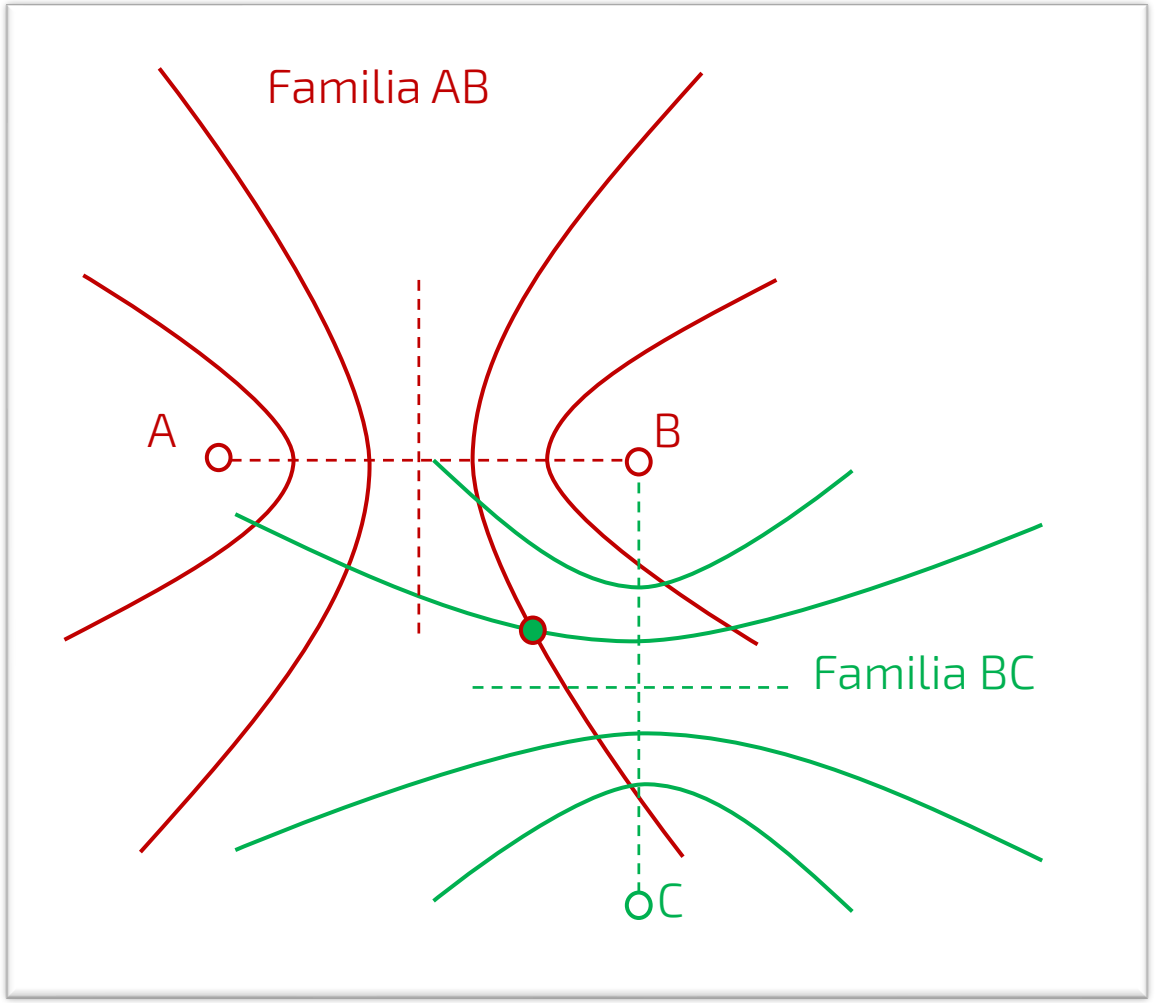
Sistemas de navegación hiperbólicos (I)

- Diferencia de distancias a dos puntos fijos midiendo diferencias de tiempo de propagación.
- Receptor situado en una hipérbola que es el lugar geométrico (líneas de posición, LOP) de los puntos cuya diferencia de distancias a dos focos fijos es constante: son las líneas que contienen la posición exacta del móvil.
- El valor de esa constante es la distancia entre los vértices V_1 y V_2 de la hipérbola $(2a)$.



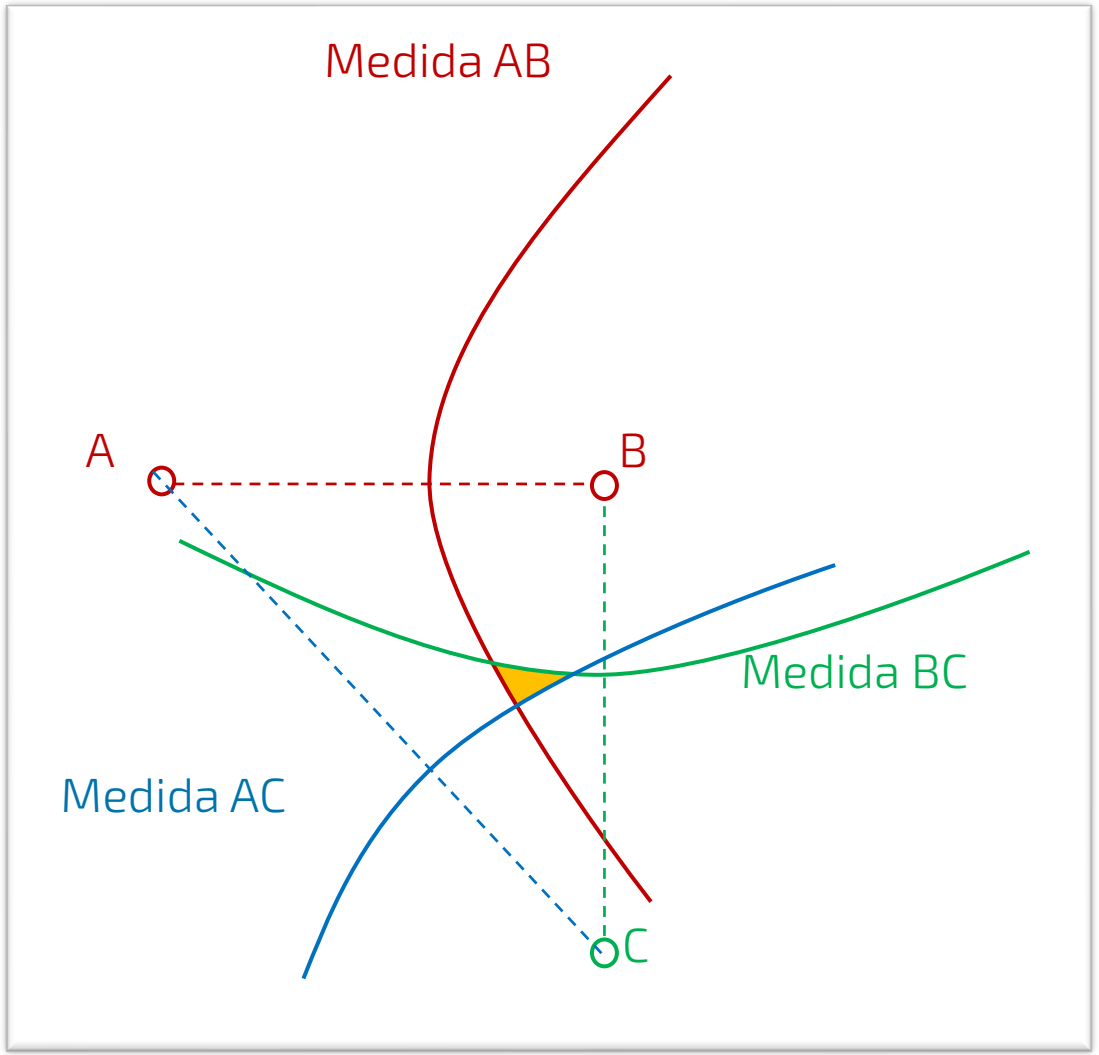
Sistemas de navegación hiperbólicos (II)

- Midiendo la diferencia de distancias a otros dos puntos fijos (uno de los cuales puede ser común con los primeros) se tiene una segunda hipérbola de localización (tercera estación y segundo par de medidas)
- La intersección de dos hipérbolas, de dos LOPs, permite determinar la posición del móvil (3 puntos de referencia y dos pares de medidas)



Sistemas de navegación hiperbólicos (III)

- Triángulo de posición probable: Intersección de 3 LOPs



Sistemas de navegación hiperbólicos (IV)

- Transmisión sincronizada
  - Si dos estaciones, Maestra (M) y esclava (E), cuya posición es conocida, emiten dos señales sincronizadas, un receptor que las sintonice y compare puede determinar la línea de posición en la que está situado.
  - Utilizando tres o más estaciones transmisoras, la intersección de dos hipérbolas permite obtener la posición del receptor. Inicialmente, se hacía sobre mapas de hipérbola, posteriormente un microprocesador resolvía la geometría y entregaba latitud y longitud.
- Dependiendo del parámetro medido:
  - Basados en la medida del retardo temporal con que se reciben los pulsos de las dos estaciones:

$$D_t = t_1 - t_2 = \frac{R_1}{c} - \frac{R_2}{c} \Rightarrow R_1 - R_2 = cD_t$$

  - Basados en la diferencia de fase con que se reciben las dos portadoras:

$$D_\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi R_1}{\lambda} - \frac{2\pi R_2}{\lambda} \Rightarrow R_1 - R_2 = \frac{\lambda D_\varphi}{2\pi}$$

Sistemas de navegación hiperbólicos (V)

- Medida y comparación de **tiempos**:
  - Sistema LORAN
- Comparación de fases de las señales recibidas de la **misma frecuencia**: posibles soluciones para distinguirlas:
  - **Multiplexar en el tiempo** la transmisión de las señales por cada una de las estaciones: sistema Omega
  - **Multiplexado en frecuencia** transmitiendo diferentes tonos múltiplos de una fundamental: sistema DECCA. La frecuencia para comparar la fase es un múltiplo común de las frecuencias recibidas
- Ventajas de este tipo de sistemas:
  - No requieren transmisión por parte del usuario: no es posible localizar al usuario por sus radiaciones electromagnéticas
  - El control de precisión del sistema está en las estaciones terrenas. El equipo embarcado puede elegirse de distintas calidades y precios en base a las necesidades del usuario
  - No requiere propagación de ida y vuelta: potencia de emisión es mucho más pequeña para el mismo alcance

Sistema LORAN (I) (LOng RAnge Navigation)

- Desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts y utilizado por primera vez por EEUU durante la II Guerra Mundial
- Principio de funcionamiento:
  - Estaciones base transmitiendo señales pulsadas a baja frecuencia.
  - Cadenas de pulsos a velocidad de repetición constante:
    - Frecuencia de repetición de pulsos: 25 pulsos/s
    - Ancho de pulso: 40 μs
- Las versiones sucesivas de Loran han recibido el nombre de A, B, C y D, pero sólo se usan el LORAN A y el LORAN C

Sistema LORAN (II)

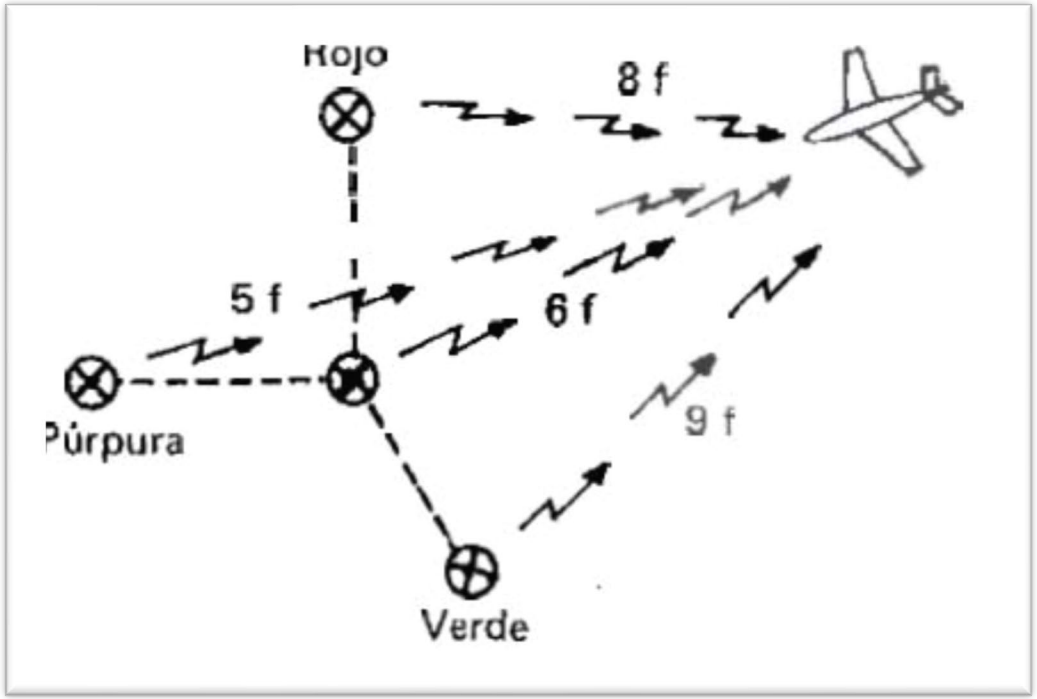
- LORAN A (en desuso):
  - Tres estaciones ⇒ Una maestra y dos auxiliares (aproximadamente a 300 Km de la maestra)
  - Potencia de transmisión de unos 100 Kw
  - Frecuencia de trabajo de 2 MHz
  - Alcance > 1000 Km.
- Cadena LORAN A:
  - Se distinguen por:
    - Frecuencia de portadora: 1850 KHz, 1900 KHz o 1950 KHz
    - Frecuencia de repetición de pulsos elegible en tres bandas: 20, 25 o 30 Hz
  - Ancho de pulso = 40 μs

Sistema LORAN (III)

- LORAN C (versión mejorada del anterior, también en desuso):
  - Desarrollado por el Departamento de Transporte de EEUU
  - Frecuencia de trabajo = 100 KHz $\Rightarrow \lambda \sim 3$ Km
    - Grandes antenas de unos 400m de altura
  - $P_t \sim$ 3000 Kw
    - Separación entre antenas ~ 1500 Km
    - Alcance > 3000 Km
- Cadena LORAN C:
  - Estación maestra (M).
  - 4 estaciones auxiliares:
    - W (Whisky)
    - X (X-Ray)
    - Y (Yankee)
    - Z (Zulu)

Sistema DECCA (I)

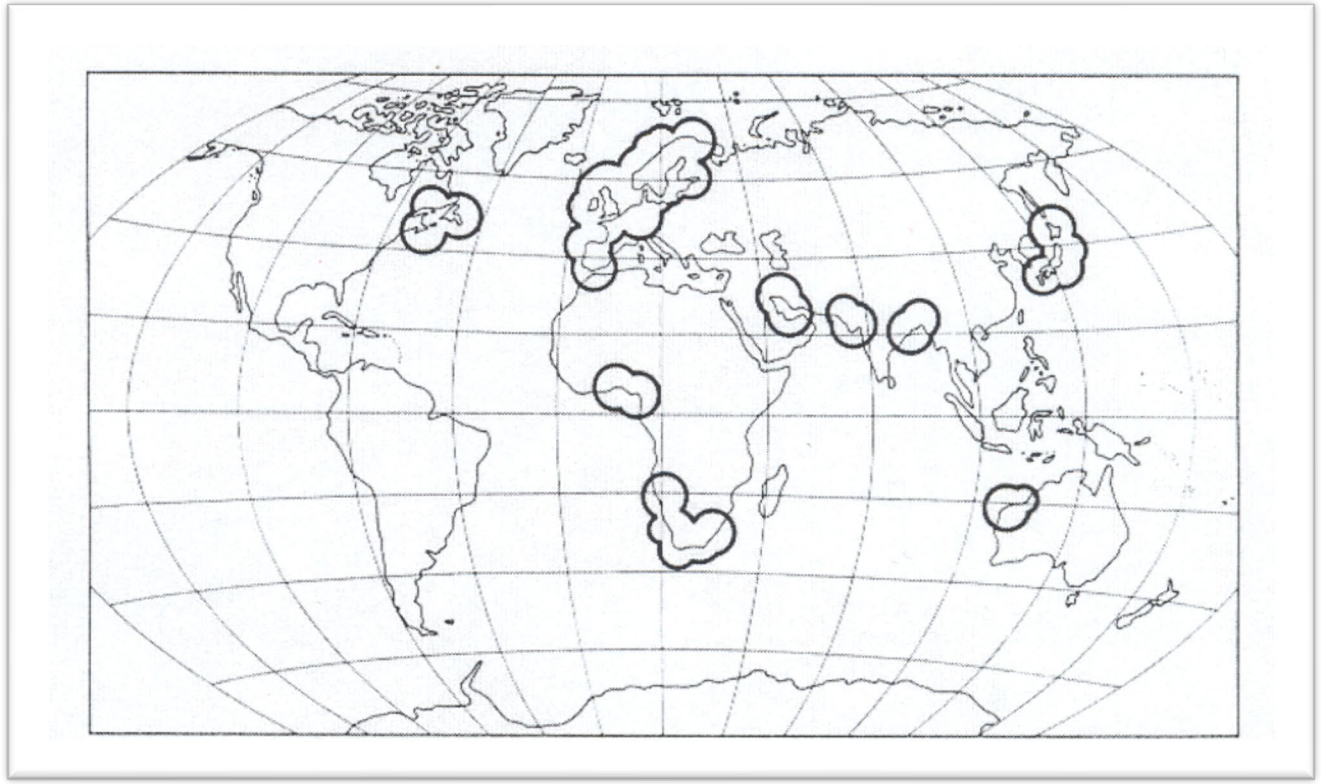
- Características:
  - Frecuencia de trabajo: 100 KHz. Potencia transmitida: 2 Kw. Altura de las antenas: 100 m
- Distinción entre antenas ⇒ Diferentes frecuencias transmitidas
- Cadena DECCA:
  - Maestra (6f) (*)
  - 3 auxiliares (*slaves*)
    - Roja (8f)
    - Verde (9f)
    - Púrpura (5f)



(*) En un ciclo de la frecuencia f, la estación maestra emite 6 ciclos, la estación roja emite 8 ciclos, la estación verde emite 9 ciclos y la estación púrpura emite 5 ciclos.

Sistema DECCA (II)

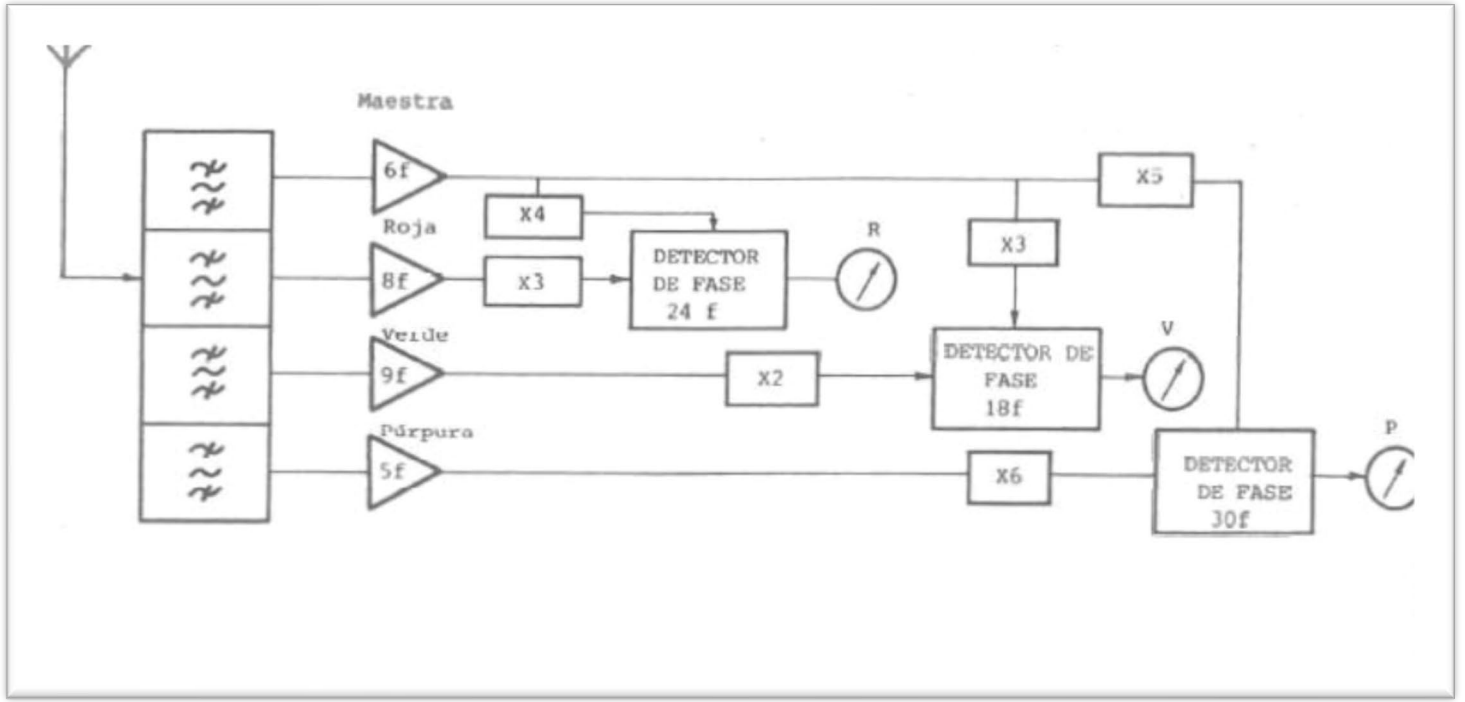
- Base de comparación ⇒ Maestra – 1 auxiliar
  - Separación: 15 – 20 Km ⇒ Alcance 400 Km
  - Utilización marítima



Cobertura de las cadenas DECCA en 1980

Sistema DECCA (III)

- Recepción ⇒ Cálculo del m.c.m. de cada base para comparar fases
  - La base roja está constituida en el receptor por las señales de frecuencia 6f y 8f. El receptor genera una frecuencia común a las dos transmisiones mediante un proceso de multiplicación de frecuencias. La frecuencia fundamental en la cadena británica es de 14.0466 KHz.



Sistema Omega (I)

- Principio de funcionamiento:
  - Sistema de navegación hiperbólico a muy baja frecuencia. Banda VLF: 10-14 KHz
    - Ventajas ⇒ Largo alcance y estabilidad
    - Inconvenientes ⇒ Antenas enormes (más de 300 m de altura).
  - Propagación por efecto guía de onda ⇒ Diferente propagación entre día y noche. Las ondas pueden penetrar hasta 15 m en el agua
  - Cobertura global con 8 estaciones transmisoras (solo transmite una cada vez)
    - Las señales están sincronizadas en fase en todas las estaciones transmisoras: relojes atómicos de cesio

Sistema Omega (II)

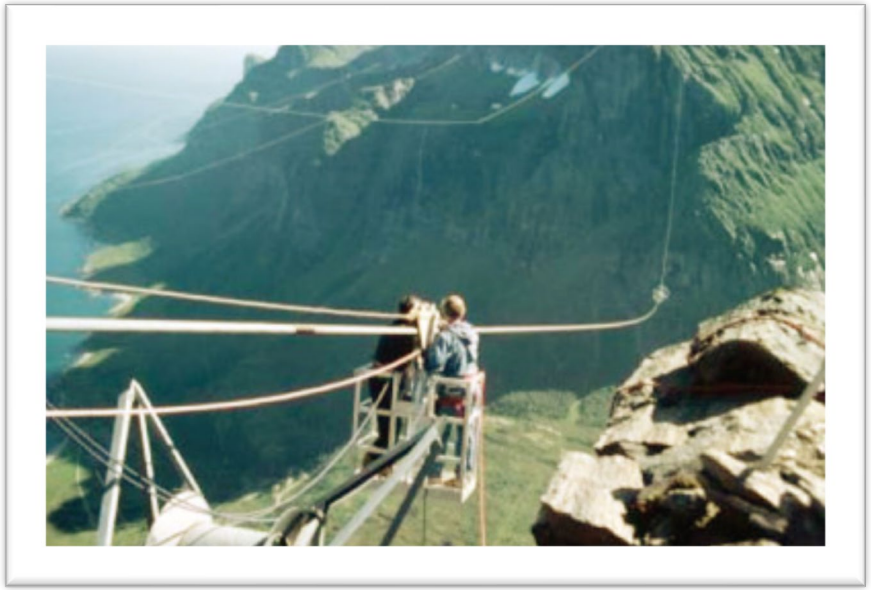
– Características de los transmisores Omega (I)

Localización	Tipo de antena	Frecuencia (kHz)
Noruega	Cables suspendidos	12.1
Paynesville, Liberia	Torre	12.0
Kaneoke, Hawai	Cables suspendidos	11.8
Le Moure, North Dakota	Monopolo	13.1
Isla Reunion, (Indico)	Torre	12.3
Golfo Nuevo, Argentina	Monopolo	12.9
Woodside, Australia	Torre	13.0
Tsushima, Japón	Monopolo	12.8

Sistema Omega (III)

- Características de los transmisores Omega (II)

Transmisor Tsushuima: Antena a 389 metros sobre un mástil tubular de acero aislado del suelo. Construido en 1973, desmantelado en 1998

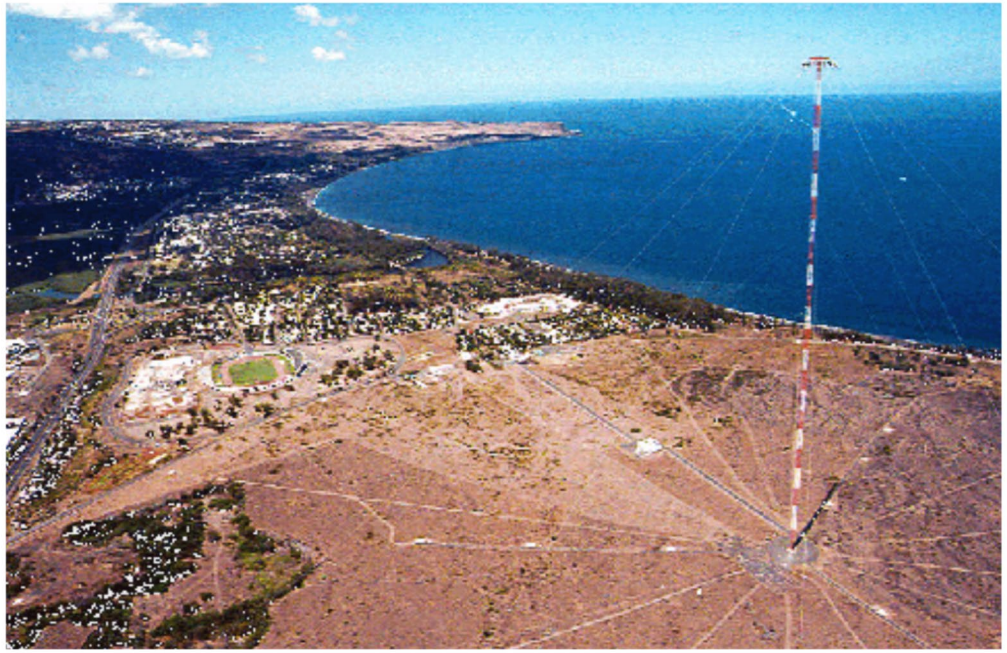


Transmisor Noruega: (a) Montes unidos por los cables de la antena. (b) Cables de las antenas que unían ambos montes

Sistema Omega (IV)

– Características de los transmisores Omega (III)

Transmisor Kaneohe: Usaba como antena un cable que se extendía sobre el valle Haiku



Transmisor Chabrier: Ubicado en la Isla Reunión con un mástil de 428 metros de altura

Sistemas de navegación por satélite (I)

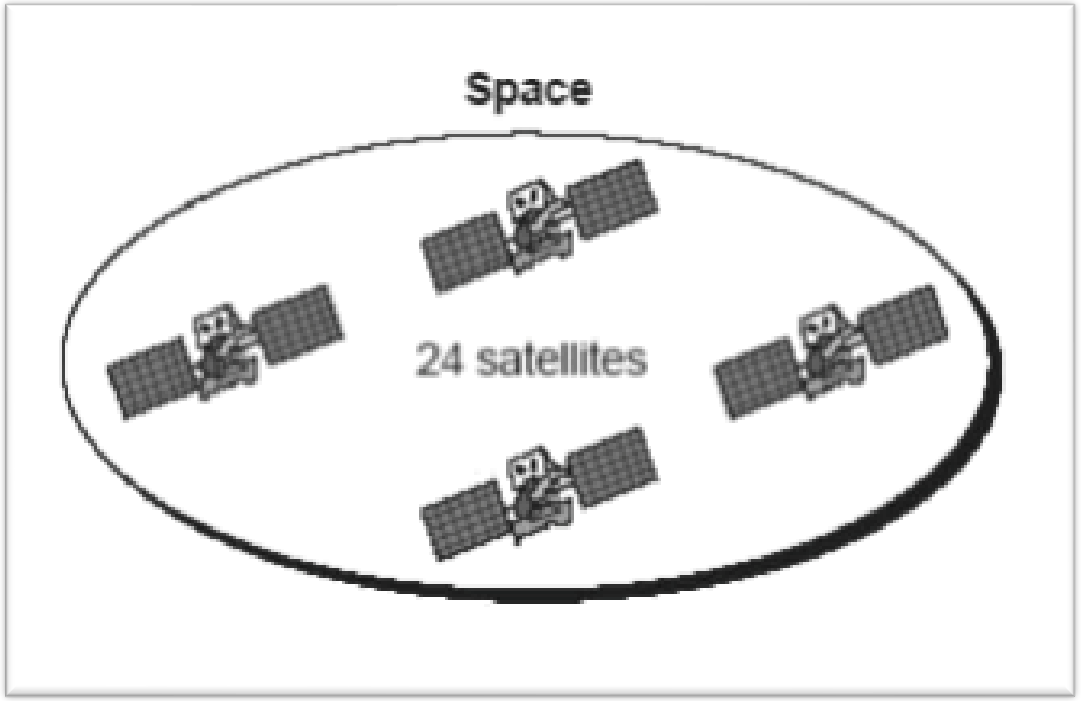
- Clasificación:
  - Servicios de Radionavegación:
    - Sólo se transmiten datos en una dirección ⇒ El receptor determina su posición a partir de las señales que recibe
    - GPS-NAVSTAR (USA), GLONASS (Rusia), Galileo (Europa), Beidou (China)
  - Servicios de Radiodeterminación:
    - Requieren una comunicación bidireccional
    - Se "interroga" a los usuarios que transmiten señales a modo de respuesta
    - Con las respuestas, las estaciones analizan la posición del receptor y la transmiten
      - INMARSAT-Standard-C (USA y Reino Unido)
      - Sistema Argos (Francia)
      - GEOSTAR, STARFIX (USA)

Sistemas de navegación por satélite (II)

- Ventajas:
  - Navegación posible cualquiera que sean las condiciones climatológicas
  - Cobertura mundial y continua
  - Movimiento rápido de los satélites ⇒ Determinación de la posición con rapidez
- Inconvenientes:
  - Equipos de abordo complejos y costosos
  - Reemplazamiento de satélites cuando se averían
  - Necesidad de estaciones terrenas para el seguimiento de los satélites

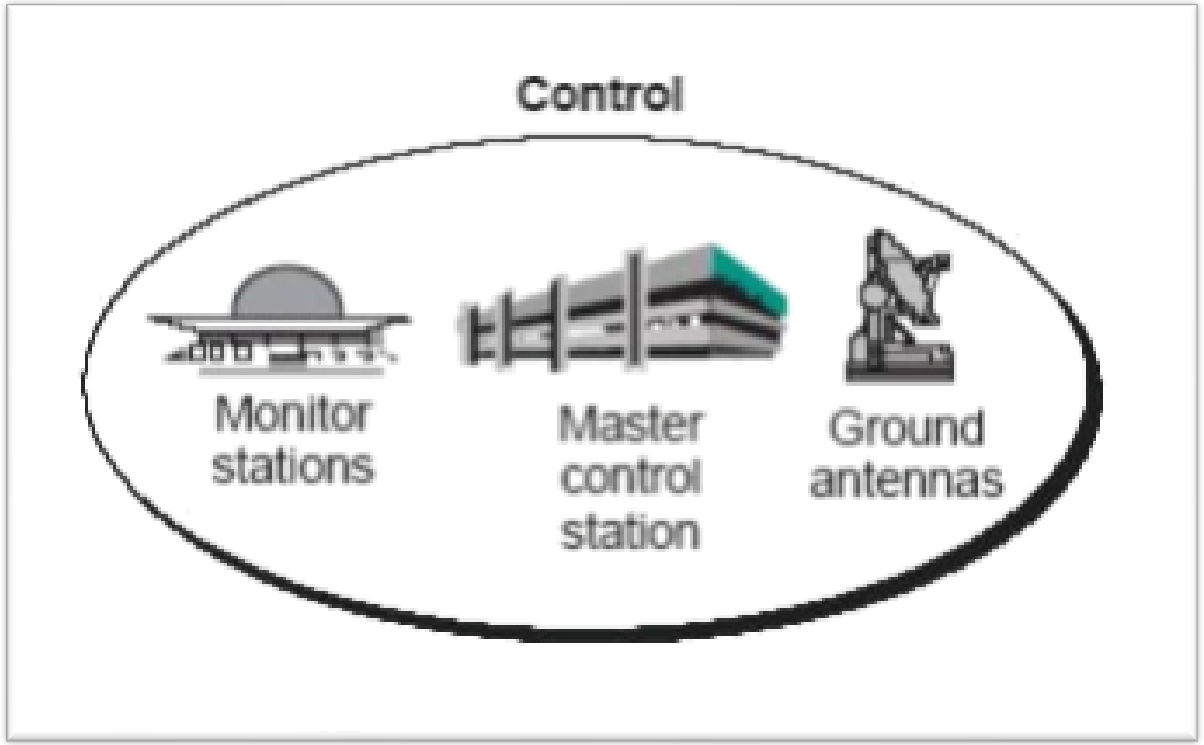
Sistemas de navegación por satélite (III)

- Partes de un sistema de navegación por satélite:
  - Segmento espacial: formado por los satélites, encargados de generar y transmitir las señales de navegación. Las órbitas deben ajustarse para que, en cualquier punto, se vea un número mínimo de satélites (son necesarios 4 satélites, en cada punto son visibles al menos 6)



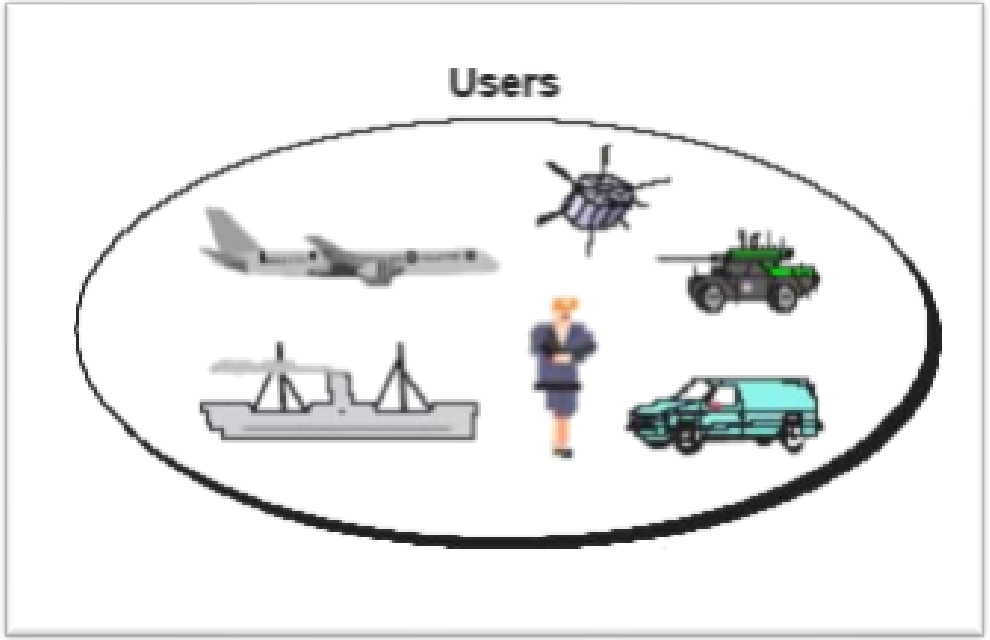
Sistemas de navegación por satélite (IV)

- Segmento de control: seguimiento, mantenimiento y control de los satélites (estaciones terrenas). Es el responsable de la monitorización de la salud de los satélites, del envío de órdenes y del control de la constelación de satélites manteniendo su configuración orbital. Además corrige las derivas de los relojes de los satélites así como otros parámetros necesarios para determinar la posición y la velocidad del usuario.



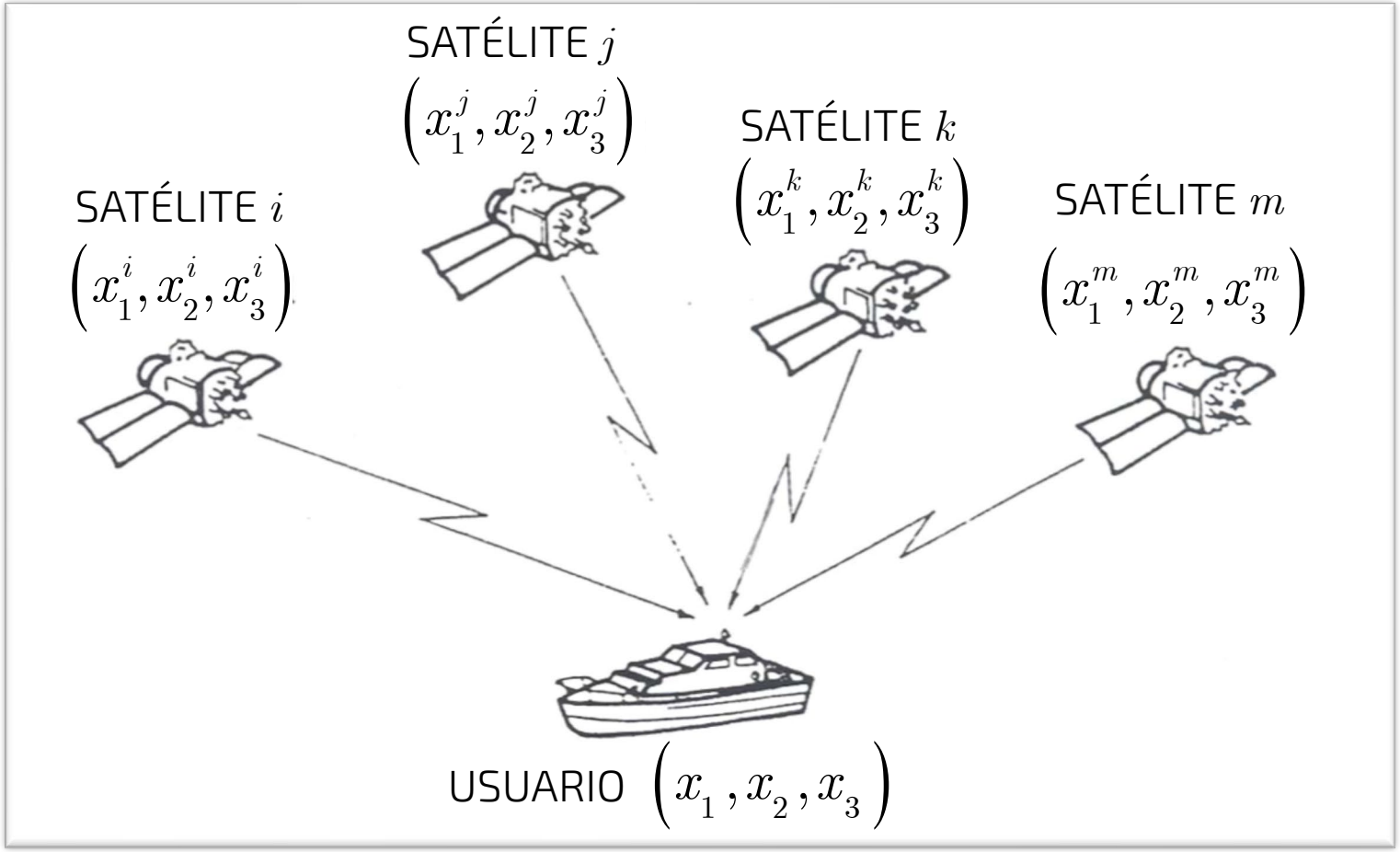
Sistemas de navegación por satélite (V)

- Segmento de usuarios (receptores fijos o móviles). El equipo receptor del usuario lleva a cabo las funciones de navegación y las asociadas a estas. Características importantes que varían de un receptor a otro:
  - Resistencia a los golpes, extremos de temperatura y humedad, …
  - Receptores militares o civiles
  - Resistencia al multicamino
  - Amplificación de la señal
  - Número de canales (número de satélites a los que se puede conectar)



Sistemas de navegación por satélite (VI)

- Obtención de la posición (medida de retardos temporales)
  - Mínimo 4 satélites: δ es la deriva del reloj del receptor



Sistemas de navegación por satélite (VII)

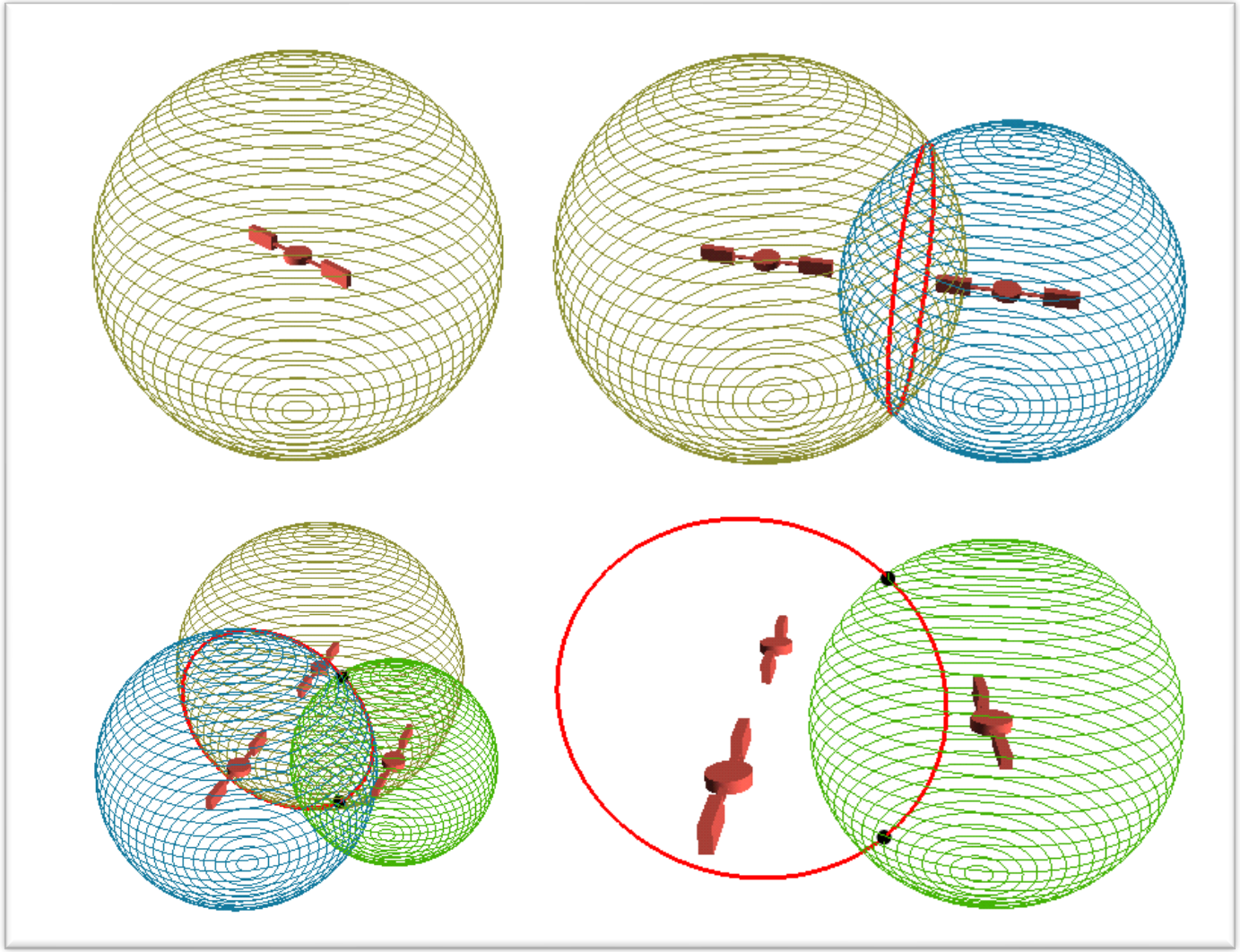
– Obtención de la posición (cont.)

$$\begin{cases} \left(x_1^i - x_1\right)^2 + \left(x_2^i - x_2\right)^2 + \left(x_3^i - x_3\right)^2 = \left(c\ \Delta T^i\right)^2 \\ \left(x_1^j - x_1\right)^2 + \left(x_2^j - x_2\right)^2 + \left(x_3^j - x_3\right)^2 = \left(c\ \Delta T^j\right)^2 \\ \left(x_1^k - x_1\right)^2 + \left(x_2^k - x_2\right)^2 + \left(x_3^k - x_3\right)^2 = \left(c\ \Delta T^k\right)^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left(x_1^i - x_1\right)^2 + \left(x_2^i - x_2\right)^2 + \left(x_3^i - x_3\right)^2 = \left(c\ \Delta T^i - c\delta\right)^2 \\ \left(x_1^j - x_1\right)^2 + \left(x_2^j - x_2\right)^2 + \left(x_3^j - x_3\right)^2 = \left(c\ \Delta T^j - c\delta\right)^2 \\ \left(x_1^k - x_1\right)^2 + \left(x_2^k - x_2\right)^2 + \left(x_3^k - x_3\right)^2 = \left(c\ \Delta T^k - c\delta\right)^2 \\ \left(x_1^m - x_1\right)^2 + \left(x_2^m - x_2\right)^2 + \left(x_3^m - x_3\right)^2 = \left(c\ \Delta T^m - c\delta\right)^2 \end{cases}$$

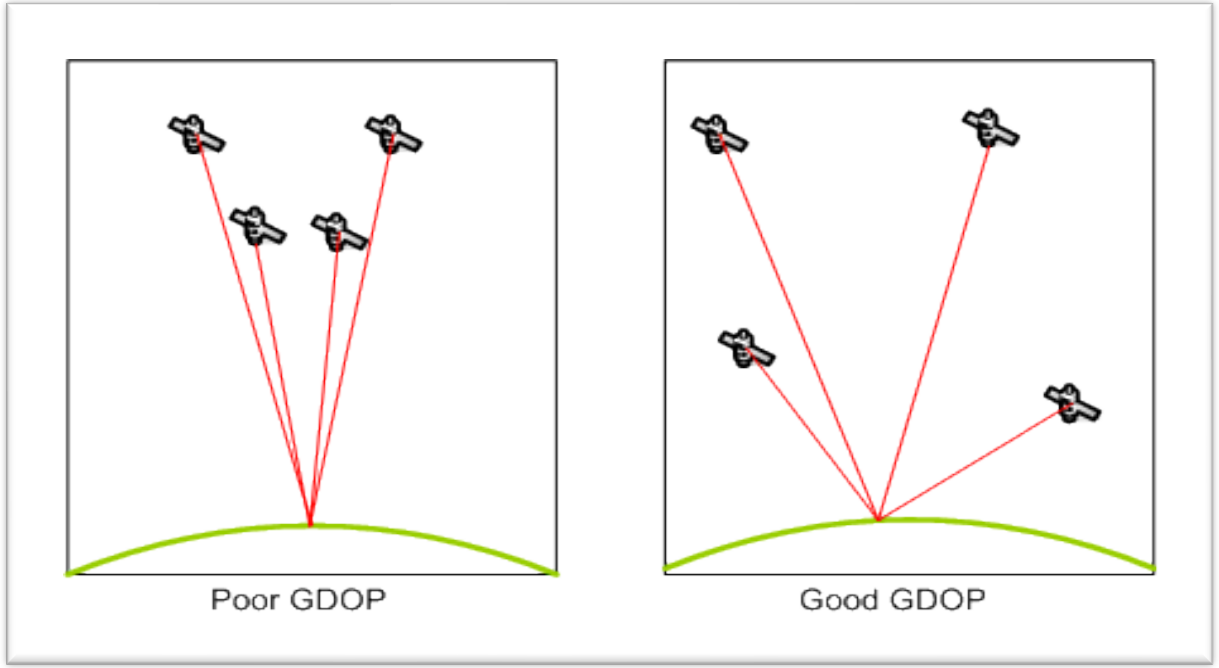
Sistemas de navegación por satélite (VIII)

- Obtención de la posición



Sistemas de navegación por satélite (IX)

- Dilución de precisión
  - Es la consistencia geométrica del conjunto de satélites que se encuentran dentro del campo de observación del receptor. Cuando los satélites se encuentran muy cerca unos de otros se dice que la geometría es débil y la DOP alta y si se encuentran muy distantes angularmente la geometría es fuerte y la DOP baja.



Sistemas de navegación por satélite (X)

- Errores en la medida:
  - Errores en la propagación de la señal
    - Las señales GPS pueden ser retrasadas al pasar por la atmósfera terrestre, especialmente en la ionosfera y la troposfera. Esto introduce errores de varios metros en la posición.
    - Multitrayectoria (Multipath): Las señales GPS se pueden reflejar en edificios, montañas o incluso el suelo antes de llegar al receptor, causando errores en la medición de la distancia (áreas urbanas).
  - Errores del reloj.
    - Los satélites GPS tienen relojes atómicos extremadamente precisos, pero el reloj del receptor es mucho menos preciso.
  - Geometría de los satélites (Dilution of Precision - DOP)
    - Si los satélites no están bien distribuidos la precisión disminuye.
  - Errores de efemérides
    - Inexactitudes en la órbita de los satélites.

Sistemas de navegación por satélite (XI)

- Errores en la medida (cont.):
  - Interferencias y ruido
    - Interferencias de radiofrecuencia.
    - Condiciones atmosféricas (tormentas o actividad solar).
  - Configuración y calidad del receptor
    - Calidad del receptor
    - Asistencia con A-GPS: El uso de A-GPS (GPS Asistido) o la integración de datos de redes celulares y Wi-Fi puede mejorar la precisión.
  - Corrección diferencial
    - DGPS (GPS Diferencial): En sistemas avanzados se utilizan estaciones de referencia terrestres (posición conocida) que emiten señales de corrección.

- Por ejemplo, bajo condiciones óptimas, un teléfono móvil equipado con un receptor GPS típico puede obtener una precisión en la ubicación con un error de 5 a 10 metros.

Sistemas de navegación por satélite (XII)

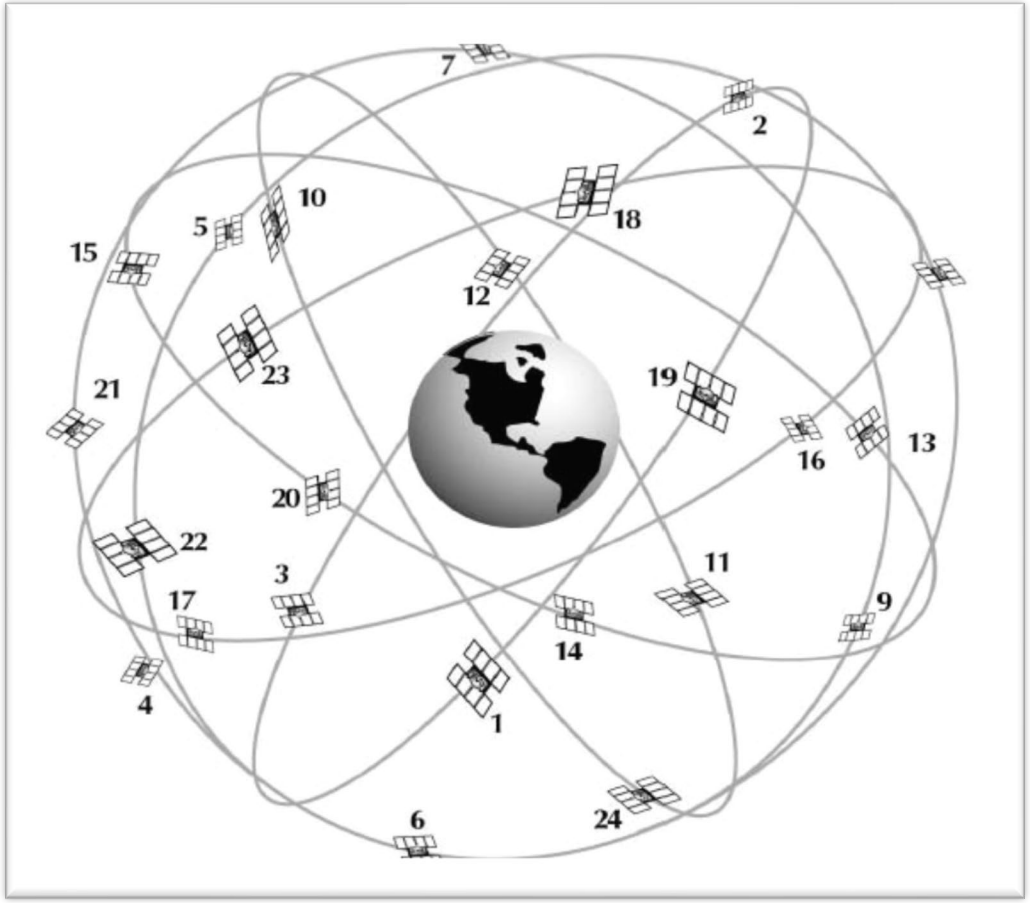
- GPS en dispositivos móviles
  - El proceso de obtener de los datos de navegación directamente de los satélites puede ser lento. Se utilizará solo cuando no hay cobertura de red celular.
  - A-GPS (Assisted GPS): Tecnología que mejora la capacidad de un dispositivo para determinar su ubicación al utilizar información adicional proporcionada por la red celular:
    - La red celular puede proporcionar al teléfono los datos de efemérides y el almanaque más actualizados (se reduce significativamente el tiempo necesario para calcular la posición).
    - La red celular también puede proporcionar una estimación inicial de la ubicación basada en la triangulación de las torres de telefonía móvil. Esto ayuda al GPS a saber qué satélites debe buscar.
    - La red celular puede sincronizar la hora del dispositivo con precisión.

Sistema NAVSTAR-GPS (I)

- Desarrollado y operado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos. Hoy en día también es ampliamente utilizado por civiles en todo el mundo.
- Ofrece cobertura global con una constelación de al menos 31 satélites operativos.
- Tiene una precisión en la posición que oscila entre 3 y 5 metros para usuarios civiles. Los servicios militares o autorizados pueden alcanzar precisiones mucho mayores.
- Servicios:
  - SPS (Standard Positioning Service): Servicio para usuarios civiles con la precisión básica.
  - PPS (Precise Positioning Service): Servicio de alta precisión (restringido a usuarios militares o autorizados).

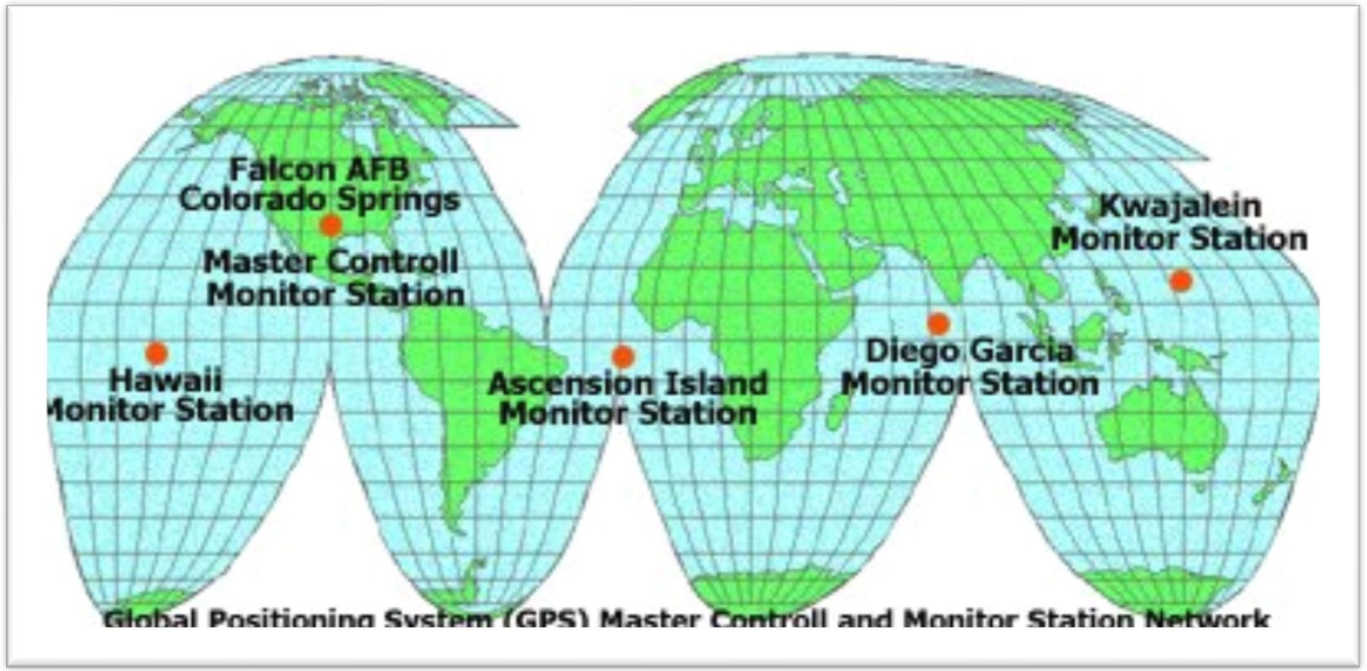
Sistema NAVSTAR-GPS (II)

- Configuración del sistema ⇒ Segmento espacial:
  - 24 satélites (se reciben señales de 6 cerca del 100% del tiempo)
  - 6 órbitas separadas 60 grados
  - Órbitas circulares:
    - 20180 Km de altitud
    - Inclinación de 55 grados
  - Periodo de 12 horas
  - Equipados con relojes muy precisos que marcan el tiempo con una precisión de 3 ns



Sistema NAVSTAR-GPS (III)

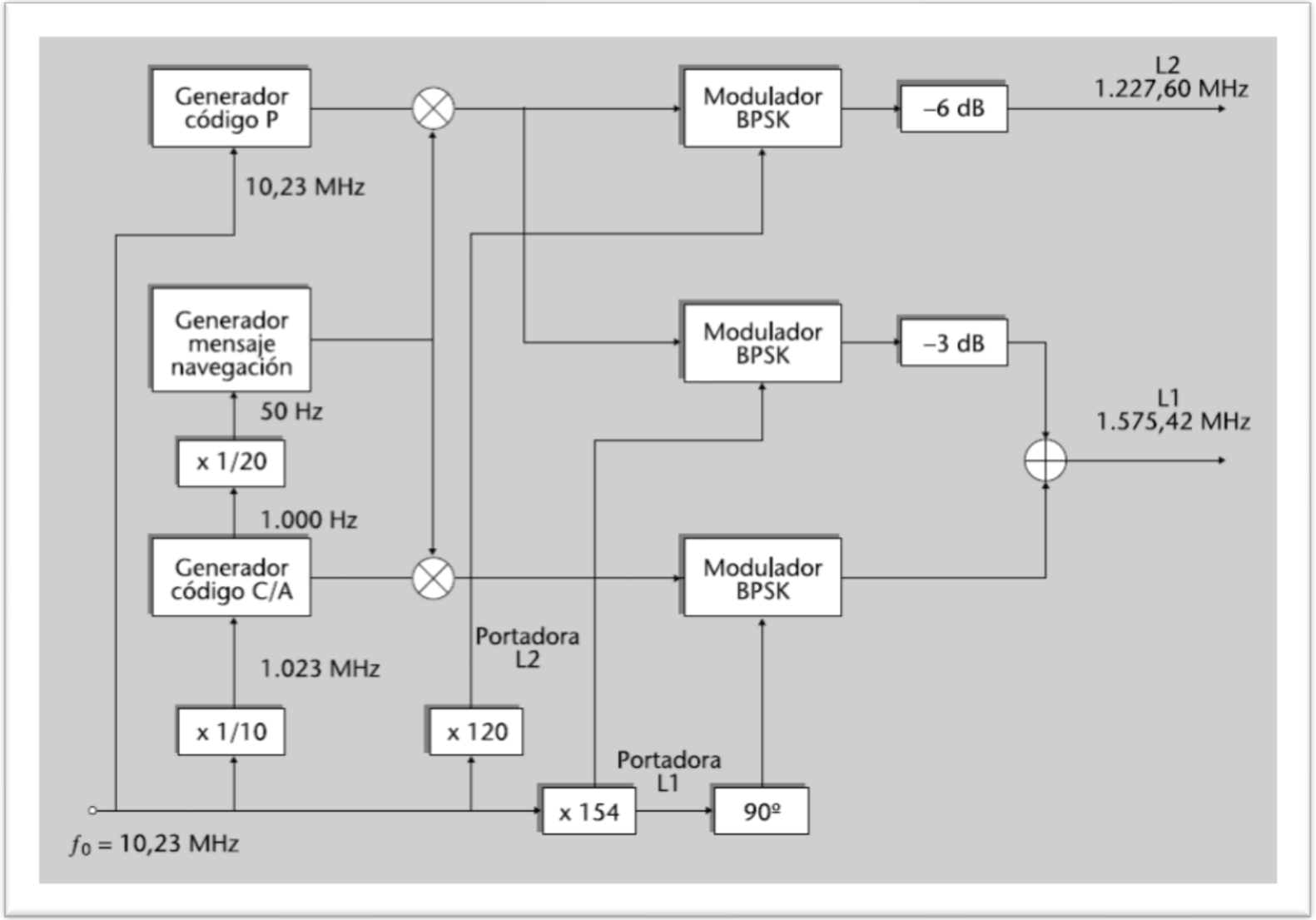
- Configuración del sistema ⇒ Segmento de control:
  - Estación Maestra en Colorado Springs
  - 5 Estaciones Monitoras: Diego García, Isla Ascensión, Kwajalein, Colorado Springs y Hawaii: están espaciadas uniformemente en longitud, conocen su propia posición con exactitud, calculan con gran precisión las órbitas de los satélites y las transmiten a la estación maestra



Estructura de la señal GPS (I)

- Es una combinación de múltiples componentes (frecuencias, códigos y datos) que se transmiten de manera continua desde los satélites hacia la Tierra para permitir a los receptores calcular su posición y tiempo con alta precisión.
- Componentes de la Señal GPS
  - Código C/A (Coarse/Acquisition): Este código de 1023 bits es un código pseudoaleatorio (PRN) que se repite cada milisegundo. Se utiliza para adquirir la señal y proporcionar la información básica para calcular la posición.
  - Código P(Y) (Precise): Este es un código más largo y complejo, utilizado principalmente por aplicaciones militares. Está cifrado (código Y) para evitar su uso no autorizado.
- Frecuencias Portadoras
  - L1 (1575.42 MHz): Frecuencia principal utilizada por los receptores civiles. En esta frecuencia se transmite la señal C/A (Coarse/Acquisition) y la señal P(Y) (Precise) para uso militar.
  - L2 (1227.60 MHz): Utilizada principalmente para la señal P(Y), aunque también transmite la señal L2C para mejorar la precisión de los receptores civiles en combinación con L1.
  - L5 (1176.45 MHz): Frecuencia adicional utilizada para mejorar la precisión y la integridad del sistema, especialmente para aplicaciones críticas como la aviación.

Estructura de la señal GPS (II)



Estructura de la señal GPS (III)

- Modulación. Las señales GPS utilizan modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK). La señal L1 modula tanto la señal C/A como la P(Y).
- Los satélites GPS transmiten datos de navegación que incluyen:
  - Efeméride: Información detallada sobre la órbita del satélite, la hora de referencia y otros parámetros. Los datos de efemérides son válidos de 2 a 4 horas. Los satélites envían los datos de efemérides aproximadamente cada 30 segundos.
  - Almanaque: Información aproximada sobre las órbitas de todos los satélites GPS en la constelación. Permite al receptor saber qué satélites están disponibles y dónde deberían estar en un momento dado, lo que acelera el proceso de adquisición de la señal. Como la información del almanaque no es tan precisa como las efemérides, no se puede usar para cálculos de posición exactos. El almanaque tiene una validez de varios días (es menos preciso que los datos de efemérides, se necesitan actualizar los datos para un cálculo preciso). El almanaque se transmite continuamente por los satélites y toma unos 12.5 minutos para ser transmitido en su totalidad.

Estructura de la señal GPS (IV)

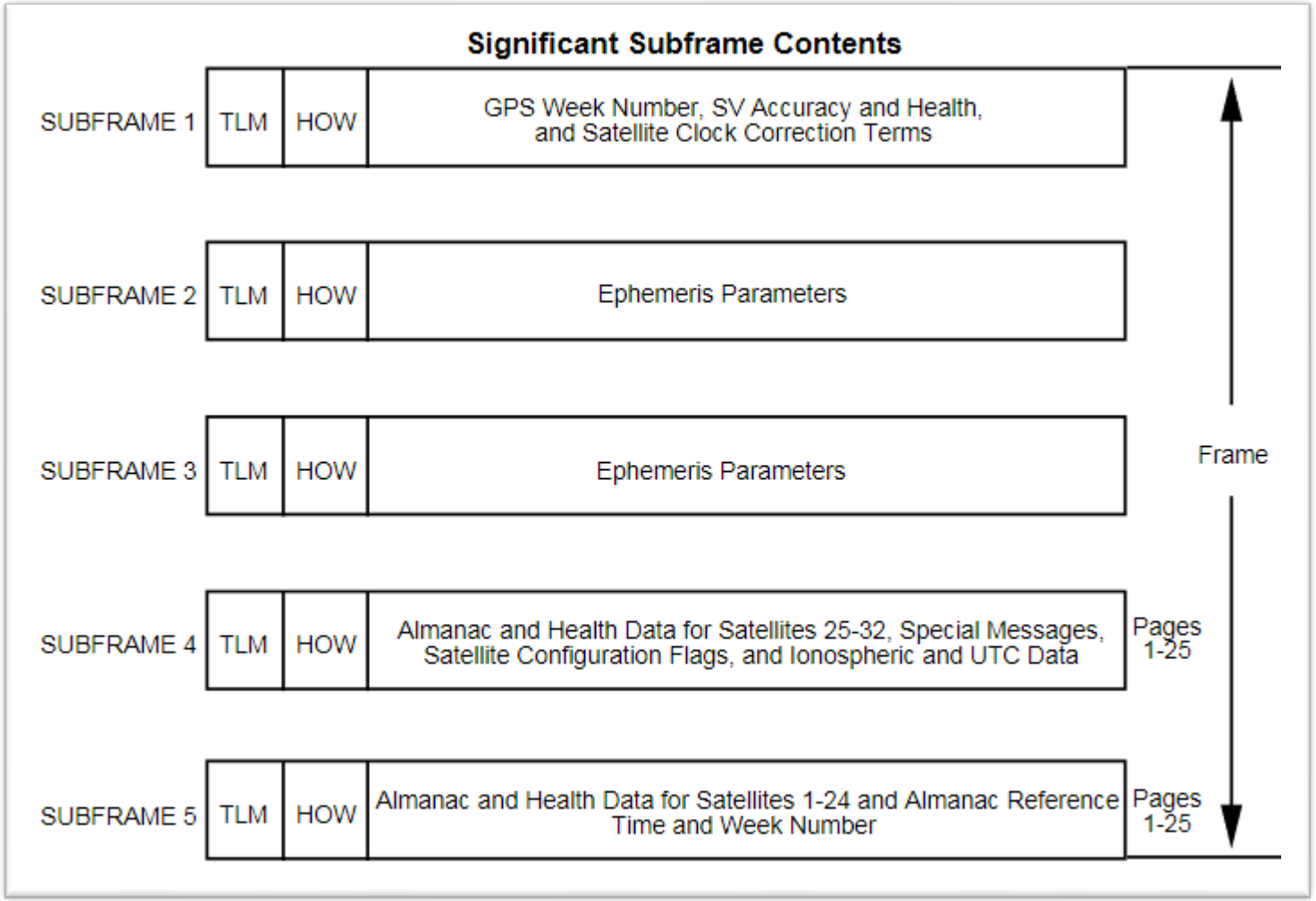
- Corrección del Reloj: Información para corregir la diferencia entre el reloj a bordo del satélite y el tiempo GPS.
- Datos de Estado: Información sobre la salud del satélite y otros parámetros importantes.

– La señal GPS está estructurada en tramas y subtramas que contienen toda la información para que un receptor GPS pueda calcular su posición. Cada trama tiene 1500 bits y se divide en 5 subtramas de 300 bits cada una.

– Estructura general de las tramas:

- Duración de cada subtrama: 6 segundos.
- Velocidad de transmisión: 50 bits por segundo (bps).

Estructura de la señal GPS (V)



Estructura de la señal GPS (VI)

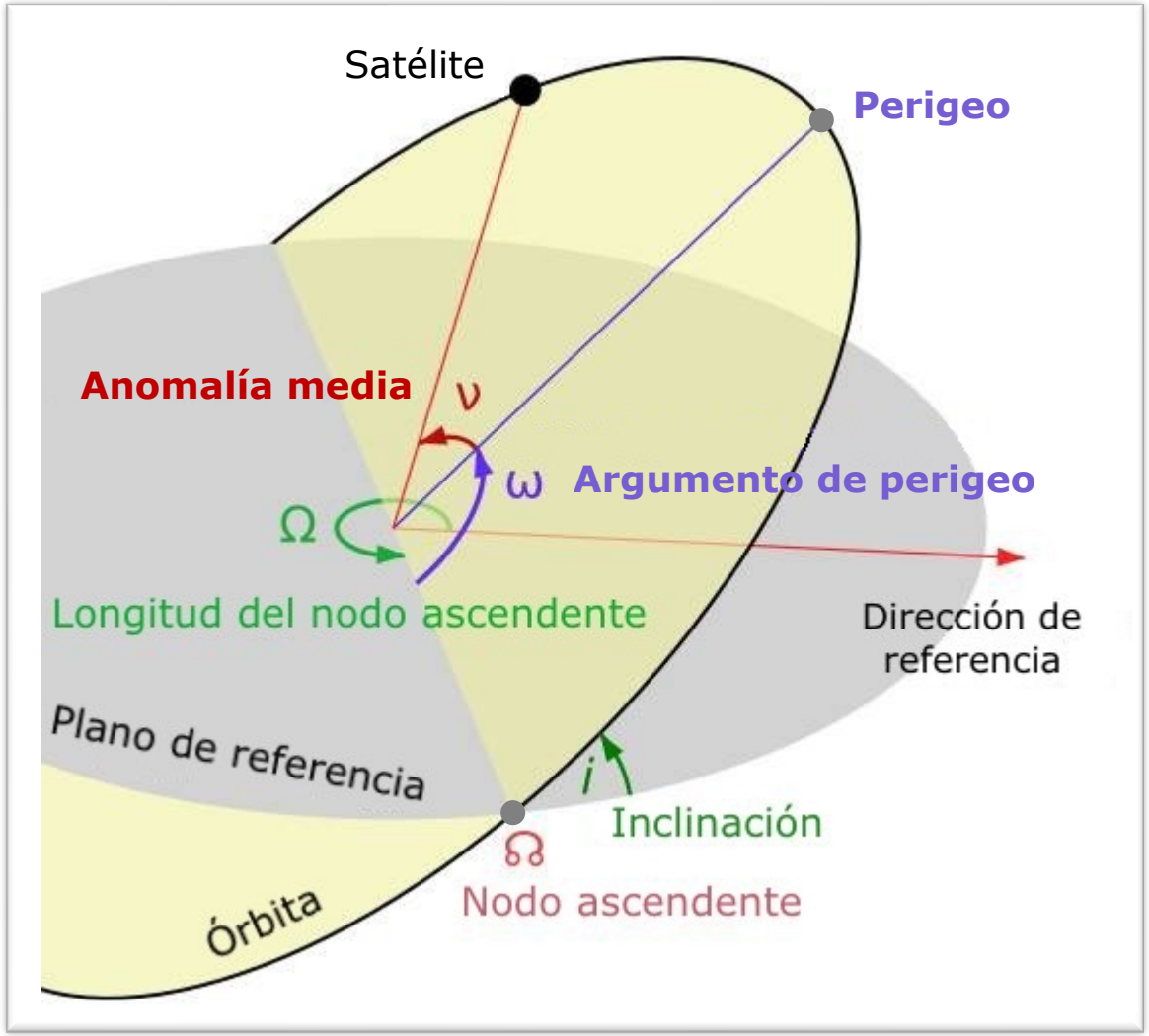
- Contenido de las Subtramas:
  - Subtrama 1: Parámetros del Reloj y del Satélite
    - Bits 1-2: Preámbulo (ID de inicio de subtrama).
    - Bits 3-22: Datos del reloj del satélite:
      - Tiempo de la semana (TOW): Marca de tiempo que indica cuándo se emitió el inicio de la subtrama.
      - Correcciones para ajustar el tiempo del satélite al tiempo GPS.
    - Bits 23-24: Indicador de alerta de salud.
    - Bits 25-32: Bits de paridad (corrección de errores).

Estructura de la señal GPS (VII)

- Contenido de las Subtramas (cont.):
  - Subtramas 2 y 3: Parámetros de la Efeméride.
    - Bits 1-2: Preámbulo.
    - Bits 3-22: Información precisa sobre la órbita del satélite, que incluye:
      - Semieje mayor corregido (a): Distancia media entre el satélite y el centro de la Tierra.
      - Excentricidad (e): Parámetro que describe la forma de la órbita.
      - Argumento del perigeo (ω): Ángulo entre el nodo ascendente y el punto más cercano al centro de la Tierra en la órbita.
      - Inclinación (i): Ángulo de inclinación de la órbita respecto al plano ecuatorial.
      - Longitud del nodo ascendente.
      - Anomalía media (ν): Posición del satélite en su órbita al inicio del mensaje.
      - Velocidades angulares: Cambios en los parámetros orbitales.

Estructura de la señal GPS (VIII)

- Contenido de las Subtramas (cont.):



Estructura de la señal GPS (IX)

- Contenido de las Subtramas (cont.):
  - Subtramas 4 y 5: Almanaque, Datos de Corrección y otros Parámetros
    - Subtrama 4:
      - Bits 1-2: Preámbulo.
      - Bits 3-22: Contiene información sobre: la órbita de otros satélites en la constelación; parámetros para corregir los efectos de la ionosfera; correcciones para ajustar entre el tiempo GPS y el tiempo universal coordinado (UTC); y el estado operativo de los satélites.
    - Subtrama 5:
      - Bits 1-2: Preámbulo.
      - Bits 3-22: Contiene: parámetros orbitales básicos de los satélites, que incluyen su posición aproximada, inclinación, y excentricidad; parámetros de salud de los satélites; mensaje de ionosfera adicional (si es necesario).

Estructura de la señal GPS (X)

- Tiempo que se tarda en recibir una señal GPS:
  - Tipos de Adquisición de Señal
    - Primer Uso o "Cold Start": Entre 30 segundos y varios minutos. El receptor GPS no tiene información previa sobre su ubicación aproximada, la órbita de los satélites (efemérides), ni la hora precisa. Es necesario encontrar los satélites, descargar los datos de efemérides y calcular su posición.
    - Reinicio o "Warm Start": Normalmente entre 20 y 30 segundos. El receptor tiene información previa reciente sobre la ubicación de los satélites y la última posición conocida. Solo necesita actualizar los datos de efemérides y calcular la posición actual.
    - Arranque en Caliente o "Hot Start": Menos de 10 segundos. El receptor GPS se ha reiniciado brevemente y todavía tiene información precisa sobre la ubicación de los satélites, la posición anterior, y la hora. El receptor solo ajusta su posición actual con los datos ya almacenados.

Sistema Galileo (I)

- Sistema europeo que trata de competir con NAVSTAR-GPS.
- Desarrollado por la Unión Europea. Es un sistema civil diseñado para ofrecer alta precisión y un servicio garantizado.
- Ofrece cobertura global, con una constelación de 30 satélites (24 operativos y 6 de repuesto).
- Diseñado para ofrecer un margen de error típico en la posición de menos de 1 metro en condiciones ideales para usuarios civiles, y hasta 20 cm para usuarios autorizados en el servicio de alta precisión (HAS).
- Servicios:
  - OS (Open Service): Para usuarios civiles con una precisión estándar alta.
  - HAS (High Accuracy Service): Servicio de alta precisión para aplicaciones que requieren un mayor nivel de exactitud.
  - SAR (Search and Rescue): Galileo también tiene la capacidad de ayudar en operaciones de búsqueda y rescate, mejorando la localización de personas en peligro.

Sistema Galileo (II)

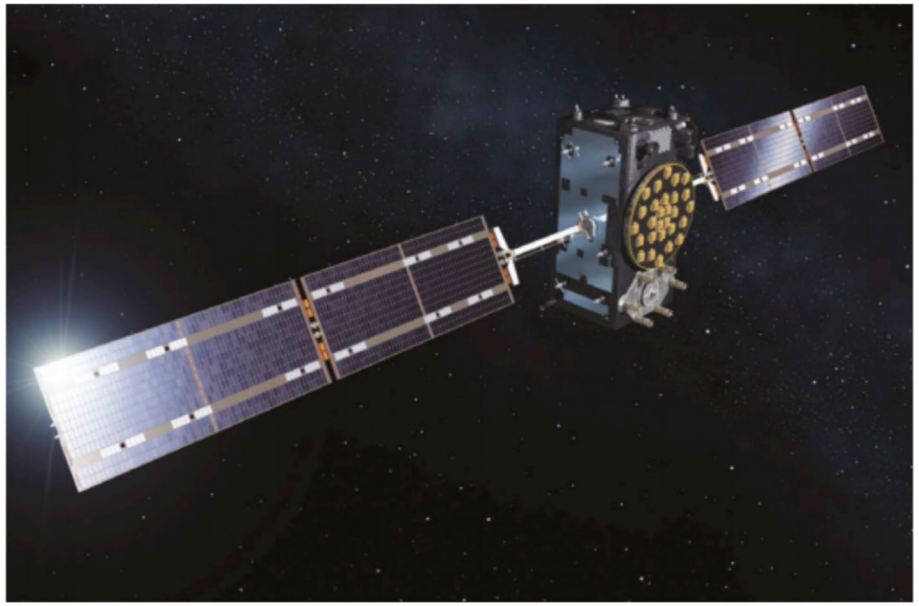
- Lista de satélites Galileo:
  - Galileo In Orbit Validation Element (GIOVE). Desarrollados con el objetivo principal de reclamar las frecuencias asignadas a Galileo por la UIT.
    - GIOVE-A (28/12/2005, retirado).
    - GIOVE-B (26/04/2008, retirado).
  - In Orbit Validation (IOV). Usados para la validación de la señal.
    - GSAT0101 y GSAT0102 (21/10/2011)
    - GSAT0103 y GSAT0104 (12/10/2012). El satélite GSAT0104 está fuera de servicio al no transmitir la señal correctamente.

Sistema Galileo (III)

- Lista de satélites Galileo (cont.):
  - Final Operational Capability (FOC)
    - GSAT0201 y GSAT0202 (22/08/2014). Inicialmente lanzados fuera de órbita. Solo son utilizados para pruebas.
    - GSAT0203 y GSAT0204 (27/03/2015). El satélite GSAT0204 es retirado del servicio hasta nuevo aviso.
    - GSAT0205 y GSAT0206 (11/09/2015).
    - GSAT0208 y GSAT0209 (17/12/2015).
    - GSAT0210 y GSAT0211 (24/05/2016). El satélite GSAT0210 es retirado del servicio hasta nuevo aviso.
    - GSAT0207, GSAT0212, GSAT0213 y GSAT0214 (17/11/2016).
    - GSAT0215, GSAT0216, GSAT0217 y GSAT0218 (12/12/2017).
    - GSAT0219, GSAT0220, GSAT0221 y GSAT0222 (25/07/2018).
    - GSAT0223, GSAT0224 (5/12/2021).
    - GSAT0225, GSAT0227 (28/04/2024, SpaceX Falcon 9). Todavía no totalmente operativos.
    - GSAT0226, GSAT0228 (¿07/2024, SpaceX Falcon 9?).

Sistema Galileo (IV)

- Satélites FM5 y FM6 (Arianespace)



Sistema GLONASS (GLobal Orbiting NAvigation Satellite System) (I)

- Sistema desarrollado por Rusia. Fue iniciado durante la era soviética y es operado actualmente por las Fuerzas Aeroespaciales Rusas.
- Ofrece cobertura global, con una constelación completa de 24 satélites operativos y algunos de repuesto.
- La precisión para usuarios civiles está en el rango de 5 a 10 metros. En regiones de latitudes altas (cerca de los polos), puede ofrecer mejor precisión que NAVSTAR-GPS debido a la configuración de sus órbitas.
- Servicios:
  - Civiles: Disponible sin restricciones con precisión similar a la de NAVSTAR-GPS.
  - Militares: Mayor precisión para usuarios autorizados.
- Lanzamiento y Desarrollo Inicial (1982-1995)
  - El desarrollo de GLONASS comenzó en la Unión Soviética en los años 70, con el primer satélite lanzado en 1982.
  - Constelación de satélites incompleta. Cobertura limitada a la región de la Unión Soviética.
  - Se alcanzó una cobertura global aproximada con 24 satélites en 1995.

Sistema GLONASS (GLobal Orbiting NAvigation Satellite System) (II)

- Declive y Problemas de Cobertura (1991-2001)
  - Debido al colapso soviético se produce una falta de financiación para mantener y lanzar nuevos satélites. Muchos satélites alcanzaron el final de su vida útil y no fueron reemplazados a tiempo. Cobertura global fuertemente deteriorada (solo 6 satélites operativos).
- Revitalización y Restauración de la Cobertura Global (2002-2011)
  - Renovación del Proyecto para restaurar la independencia tecnológica de Rusia en navegación por satélite.
  - En 2010 se volvió a alcanzar una cobertura global completa con 24 satélites operativos.
  - Desde 2011 se ha mantenido una cobertura global estable con actualizaciones periódicas y reemplazos de satélites para asegurar que siga siendo competitivo.

Otros sistemas

- BeiDou (BDS). China.
  - La versión inicial (BDS-1) proporcionaba servicios regionales limitados a China y sus alrededores.
  - La expansión a BDS-2 y finalmente BDS-3, completada en 2020, ofrece cobertura global.
  - BeiDou es interoperable con otros sistemas de posicionamiento por satélite.
- QZSS (Quasi-Zenith Satellite System). Japón.
  - Operativo con cobertura regional ampliada (Asia-Pacífico), pero complementa otros sistemas para cobertura global.
  - La constelación actual de QZSS consta de cuatro satélites, con planes de expandirse en el futuro.
- NavIC (Indian Regional Navigation Satellite System - IRNSS). India.
  - Operativo con cobertura regional (India y hasta 1.500 km alrededor).
  - Proporciona servicios de posicionamiento muy precisos en su área de cobertura.

Comparación de sistemas (I)

- Precisión:
  - Galileo: Generalmente ofrece mayor precisión para usuarios civiles, con menos de 1 metro de error en condiciones óptimas.
  - NAVSTAR-GPS: Tiene una precisión civil de 3 a 5 metros en condiciones normales, con posibilidad de mejorar mediante técnicas de corrección.
  - GLONASS: La precisión civil está en el rango de 5 a 10 metros. Puede ser mejor en latitudes altas.
- Cobertura Global:
  - Iguales. GLONASS es particularmente efectivo en regiones de alta latitud.
- Independencia:
  - Galileo: Sistema civil y autónomo, gestionado por la Unión Europea.
  - NAVSTAR-GPS: Sistema militar de uso gratuito para civiles. En situaciones críticas el gobierno de USA podría limitar el acceso a sus servicios.
  - GLONASS: Controlado por las Fuerzas Aeroespaciales Rusas, es independiente y diseñado para asegurar que Rusia no dependa de otros sistemas.

Comparación de sistemas (II)

- Interoperabilidad:
  - Todos están diseñados para ser interoperables, lo que mejora la precisión, la disponibilidad y la fiabilidad cuando se utilizan de forma simultánea.

Resumen

- Galileo podría considerarse superior en términos de precisión y servicio para aplicaciones civiles. NAVSTAR-GPS es más maduro y es ampliamente compatible con una gran variedad de dispositivos. GLONASS es particularmente efectivo en regiones de alta latitud.