

ADF

Ing. J.O. García (jgarcia@efn.uncor.edu)

2 de octubre de 2014

Índice

1. Introducción	1
2. Ondas Electromagnéticas	2
2.1. Características generales	2
2.2. Modulación	4
2.3. El espectro electromagnético	6
2.4. Propiedades de la propagación	7
3. Sistema de Navegación Hiperbólicos	10
3.1. Introducción	10
3.1.1. Técnicas de navegación hiperbólica	11
3.2. LORAN	14
3.3. DECCA	15
3.3.1. Funcionamiento	15
4. ADF	21
4.1. Introducción	21
4.2. Antena de cuadro	23
4.3. Radiogoniómetro	23
4.4. ADF	25
4.4.1. NDB	29
4.4.2. Errores ADF-NDB	30

1. Introducción

Como su nombre lo indica, las radioayudas basan su funcionamiento en las ondas de radio.

Por ello, es conveniente comenzar explicando los conceptos básicos asociados a las ondas en general y a las ondas electromagnéticas en particular (de las cuales las ondas de radio son apenas un subconjunto).

Posteriormente se describe uno de los primeros sistemas de radioayudas, que aún hoy se encuentra en uso, el LORAN.

Finalmente se describe un sistema posterior de radioayuda, el ADF.

2. Ondas Electromagnéticas

2.1. Características generales

En este sentido, es menester empezar definiendo lo que es una onda electromagnética: es un tipo de radiación en forma de onda que se caracteriza por poseer dos campos: un campo eléctrico y otro campo magnético, oscilando perpendicularmente entre sí. La Figura 1 representa una onda electromagnética:

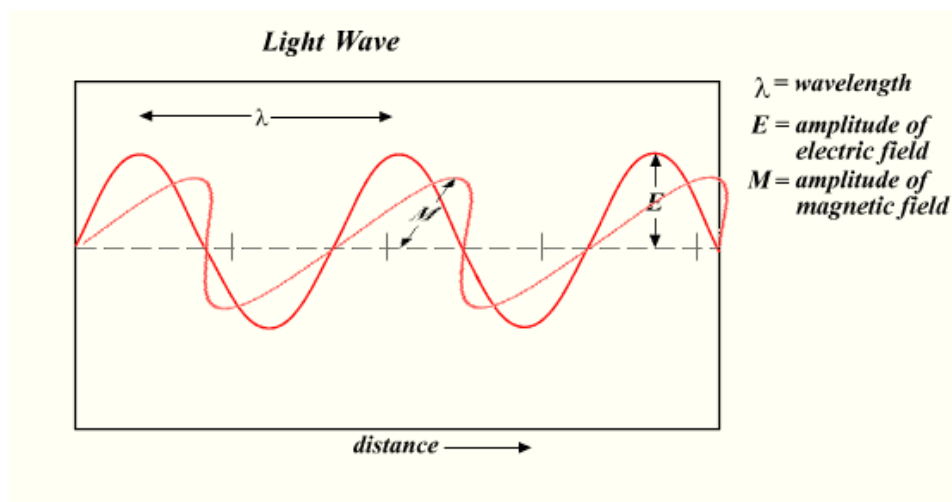


Figura 1: Onda electromagnética [3]

Para entender mejor su comportamiento, se recuerdan los siguientes conceptos:

Ciclo Es cada patrón repetitivo de una onda.

Período Tiempo que tarda la onda en completar un ciclo.

Frecuencia Número de ciclos que completa la onda en un intervalo de tiempo. Si dicho intervalo es de un segundo, la unidad de frecuencia es el Hertz (Hz). Otras unidades de frecuencias muy utilizadas (en otros ámbitos) son las “*revoluciones por minuto*” (RPM) y los “*radianes por segundo*” (rad/s).

El período y la frecuencia están relacionados como $f = 1/T$

Amplitud Es la medida de la magnitud de la máxima perturbación del medio producida por la onda.

Longitud La longitud de una onda viene determinada por la distancia entre los puntos inicial y final de un ciclo (por ejemplo, entre un valle de la onda y el siguiente). Habitualmente se denota con la letra griega λ (lambda).

Un factor importante a tener en cuenta es que el tamaño y diseño de las antenas está fuertemente influenciado por la longitud de onda. Por ejemplo, una antena dipolo sencilla debe tener una longitud $\lambda/2$ para que sintonice de manera óptima las ondas de longitud λ .

Los conceptos anteriores están representados en la Figura 2.

Velocidad Las ondas se desplazan a una velocidad que depende de la naturaleza de la onda y del medio por el cual se mueven. En el caso de la luz, por ejemplo, la velocidad en el vacío se denota c y vale 299.792.458 m/s (aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s).

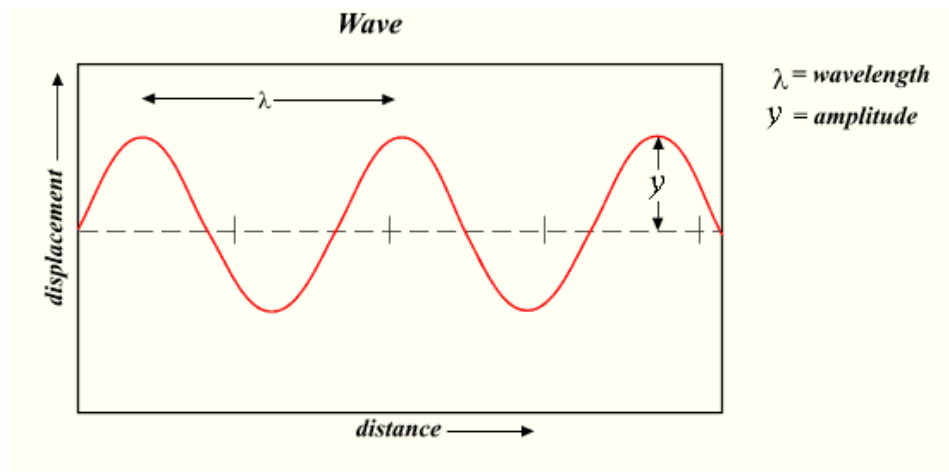


Figura 2: Propiedades de una onda [3]

Los conceptos de velocidad, longitud y frecuencia están interrelacionados. Para el caso de las ondas electromagnéticas (de las cuales la luz es un ejemplo), la relación se expresa como $\lambda = c/f$

Fase La fase de una onda relaciona la posición de una característica específica del ciclo (como por ejemplo un pico), con la posición de esa misma característica en otra onda. Puede medirse en unidades de tiempo, distancia, fracción de la longitud de onda o (más comúnmente) como un ángulo.

Tomese en cuenta que la definición de fase lleva implícita la comparación de dos ondas de la misma frecuencia, pues en caso contrario no tiene mucho sentido dicha comparación.

La Figura 3 muestra varias ondas con diferentes fases.



Figura 3: Ondas con diferentes fases [3]

Polarización Representa la orientación con la que la onda oscila, y en el caso particular de las ondas electromagnéticas, la orientación en la oscilación del campo eléctrico. A menudo esta orientación es una línea y por ello se habla típicamente de ondas con polarización vertical u horizontal, es decir, cuando el campo eléctrico oscila en un plano con esas direcciones.

Adicionalmente, es posible que el campo eléctrico cambie su orientación conforme la onda avanza. Se habla entonces de ondas con polarización circular

Diagramas de radiación Las ondas electromagnéticas utilizadas por las radioayudas típicamente se emiten o reciben utilizando diferentes tipos de antenas. Dependiendo del tipo de antena utilizada, la energía electromagnética puede o no emitirse (o recibirse) con igual intensidad en todas las direcciones. Se denomina entonces diagrama de radiación (o emisión) a un diagrama polar que represente la intensidad relativa de la señal electromagnética en función del azimut alrededor de la antena. En la Figura 6 se presentan dos diagramas de radiación. El de la

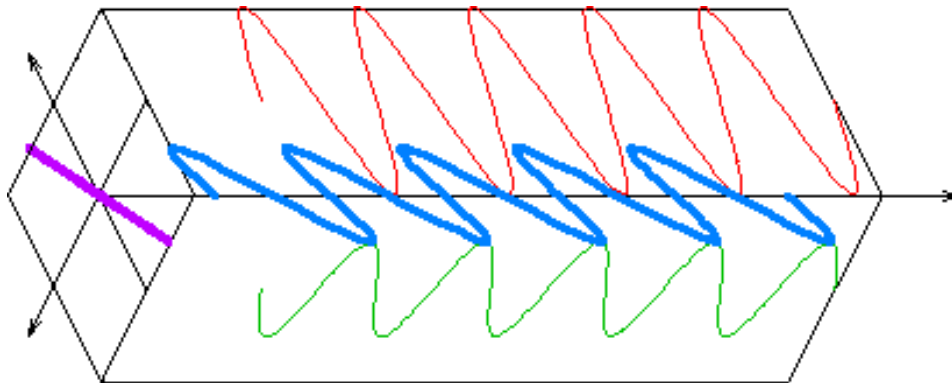


Figura 4: Polarización de las ondas electromagnéticas [3]

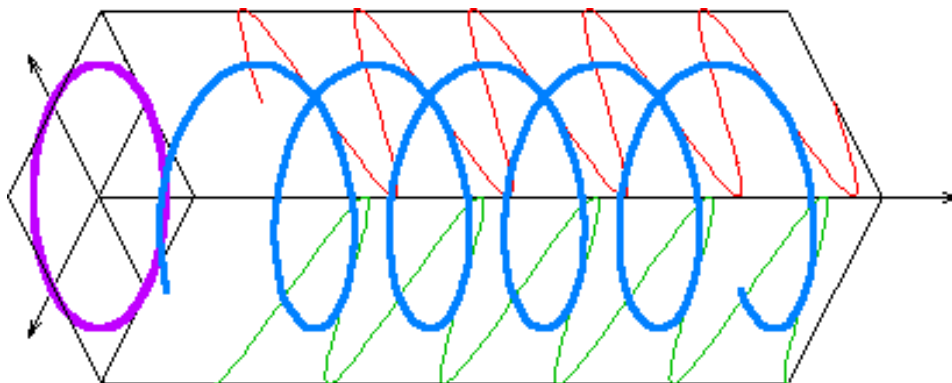


Figura 5: Onda con polarización circular [3]

izquierda es en forma de “ocho” y es muy usado en aviación, mientras que el de la derecha representa una antena isótropa (o no-direccional: aquella cuya emisión o recepción no depende de la dirección).

2.2. Modulación

Cuando se compara el rango de frecuencia típico de la voz humana (400 Hz a 4000 Hz) con el rango de frecuencia de las ondas de radio (a partir de los 30 kHz, aproximadamente), se hace evidente que no es posible convertir directamente de sonido a radio. Es necesario llevar a cabo un proceso intermedio para transmitir una onda de baja frecuencia utilizando una de mayor frecuencia.

Se define entonces la Modulación como el proceso de alterar las características de una onda (llamada portadora o carrier) para que transporte información.

Son varios los parámetros de la portadora que se pueden alterar, pero los más habituales en el contexto aeronáutico son la amplitud y la frecuencia.

AM Se modifica la amplitud de la portadora en proporción directa a la señal moduladora. Este fue el primer método para la emisión de radio comercial. En la Figura 7(a) se esquematiza la modulación AM.

FM La información se representa mediante variaciones de la frecuencia instantánea de la onda portadora. La modulación FM se representa en la Figura 7(b).

Bandas laterales En comunicaciones vía radio se denomina así a las bandas de frecuencias superiores y/o inferiores a la de la portadora que aparecen por causa del proceso de modulación.

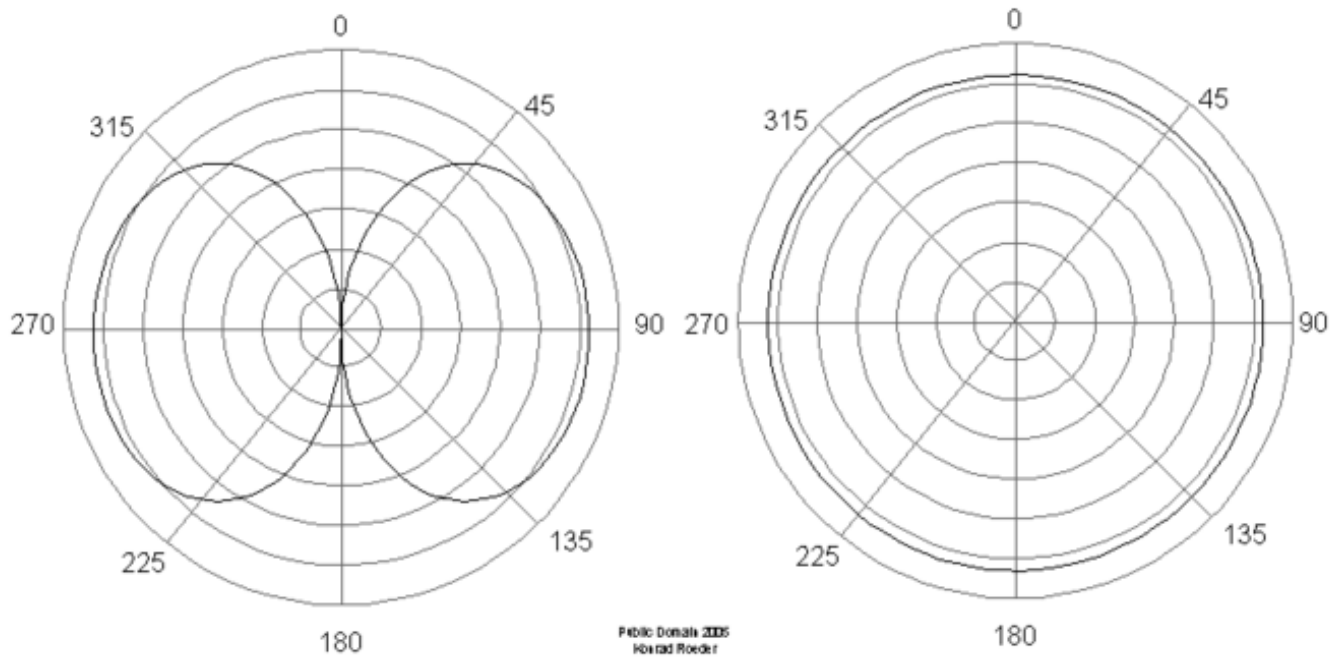
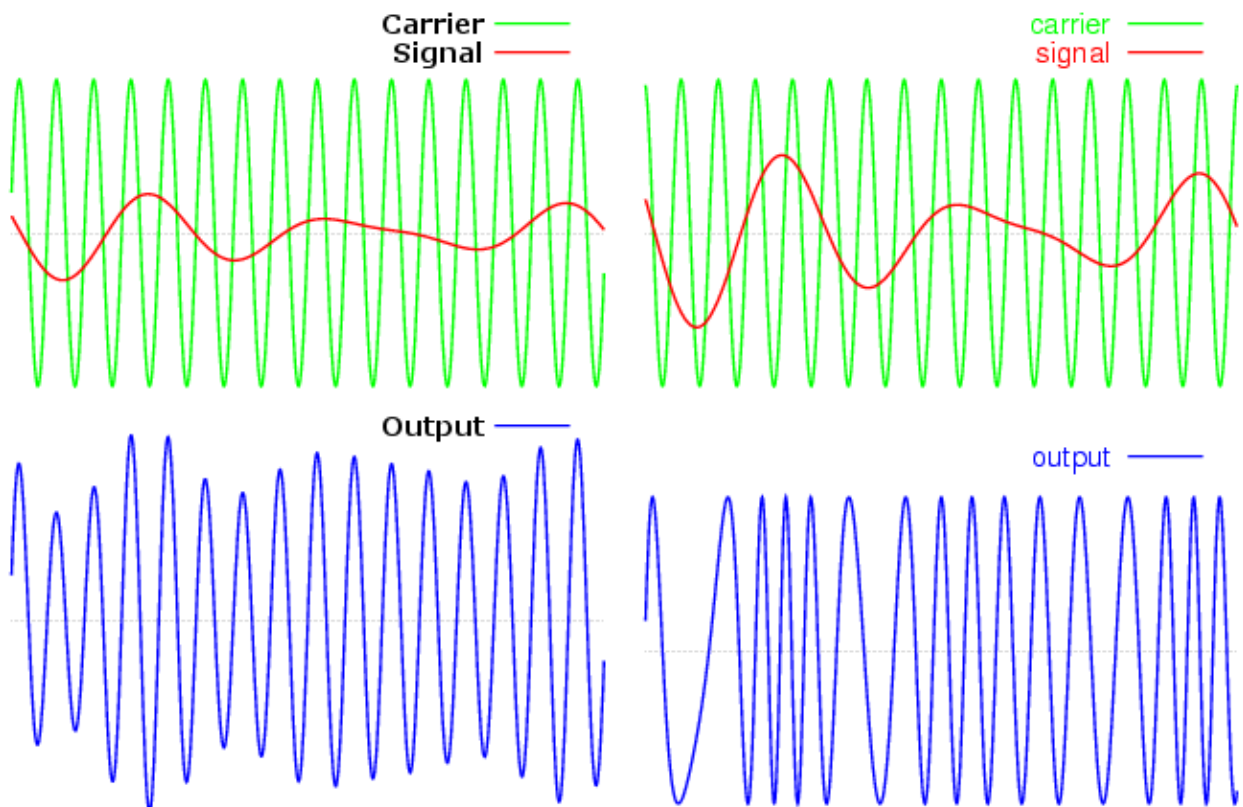


Figura 6: Diagramas de radiación [3]



(a) Modulación en amplitud [3]

(b) Modulación en frecuencia [3]

Figura 7: Modulación de ondas electromagnéticas

Canal Es una banda de radiofrecuencia específica que ha sido asignada para un uso dado por medio de acuerdos internacionales. Por ejemplo, los canales de voz en aeronáutica tienen un ancho predefinido de 50 kHz, lo que incluye el espacio para la banda de voz, las bandas laterales que aparezcan al modular, y unos márgenes en los extremos para separarlos adecuadamente de los canales adyacentes.

2.3. El espectro electromagnético

Se denomina espectro electromagnético a todo el rango posible de radiación electromagnética. Esto incluye las ondas de radio, los infrarrojos, la luz, los ultravioletas, los rayos X, gamma, etc. En la Figura 8 se presenta el espectro completo.

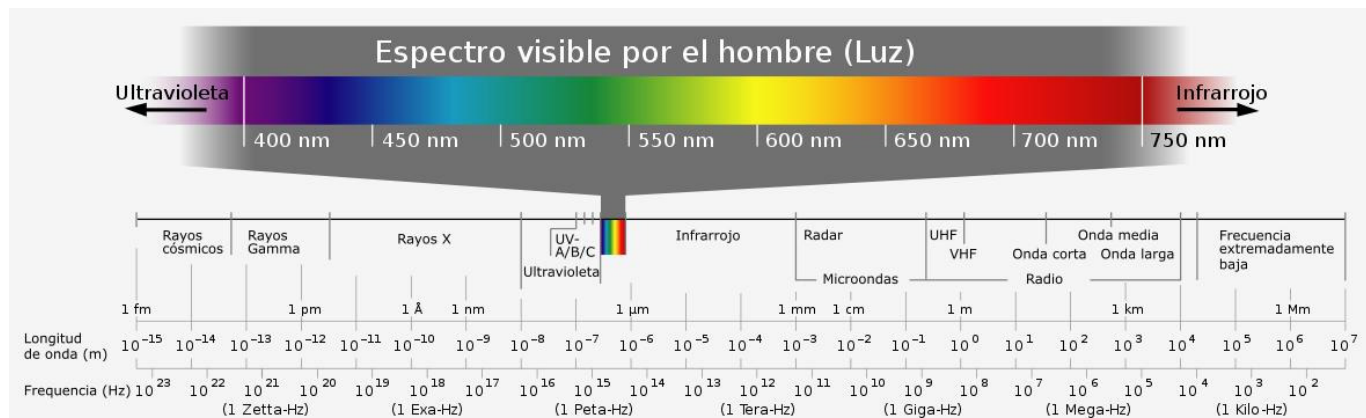


Figura 8: Espectro electromagnético

En función de lo anterior, el espectro radioeléctrico o de radiofrecuencia (RF) se refiere a la porción del espectro electromagnético en el cual las ondas electromagnéticas pueden generarse alimentando a una antena con corriente alterna. La Tabla ?? presenta las bandas de RF más importantes.

Tabla 1: Espectro radioeléctrico

Abreviatura	Nombre	Frecuencia	Algunos usos
VLF	Very Low Frequency	3-30 kHz	Loran-C
LF	Low Frequency	30-300 kHz	ADF/NDB
MF	Medium Frequency	300-3000 kHz	ADF/NDB
HF	High Frequency	3-30 MHz	COMM larga distancia
VHF	Very High Frequency	30-300 MHz	VOR, COMM ACFT
UHF	Ultra High Frequency	300-3000 MHz	DME, radar, GNSS
SHF	Super High Frequency	3-30 GHz	Radar, COMM microondas
EHF	Extremely High Frequency	30-300 GHz	Radioastronomía

A mayor frecuencia la longitud de onda se reduce, razón por la cual es posible encontrar también la tabla anterior en función de la longitud y clasificando el espectro en ondas kilométricas, decimétricas, milimétricas, etc.

2.4. Propiedades de la propagación

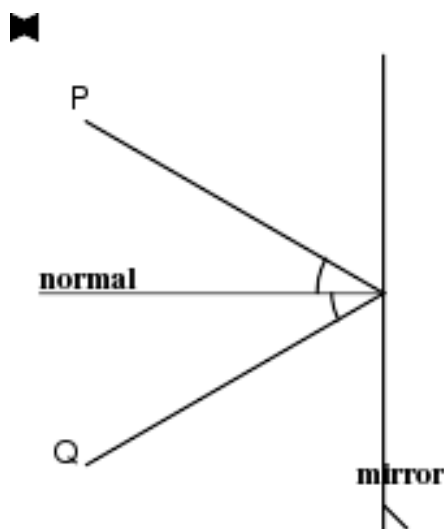
Las características de la propagación de las ondas electromagnéticas son importantes para comprender algunas de las características de los sistemas que las utilizan. Por eso, en esta sección se repasarán los aspectos más importantes de la propagación.

Hay algunas propiedades generales de la propagación que son independientes de la frecuencia de la onda RF de la cual se esté hablando:

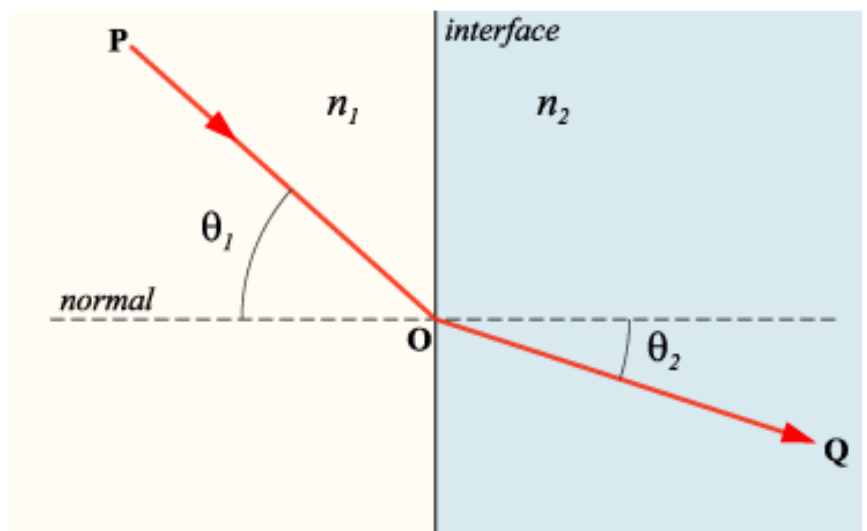
- La velocidad de una onda electromagnética es constante mientras no cambie el medio de propagación.
- La velocidad de una onda electromagnética en el vacío es siempre $c = 299792458 \text{ m/s}$.
- Las ondas electromagnéticas tienden a reflejarse en objetos de tamaño similar a su longitud de onda (λ).
- Las ondas electromagnéticas se propagan en línea recta mientras no sufran influencias externas ni cambien de medio de propagación

Es oportuno recordar que la reflexión es el cambio abrupto en la dirección de la onda cuando ésta llega a la unión de dos medios diferentes, regresando al medio original (Figura 9(a)) .

Por otro lado, la refracción es el cambio en velocidad de una onda cuando pasa de un medio a otro. Es de hacer notar que a menudo el cambio en velocidad implica un cambio de dirección (dado que la velocidad es un vector), tal como se muestra en la Figura 9(b).



(a) Fenómeno de reflexión [3]



(b) Fenómeno de refracción [3]

Figura 9: Fenómenos que ocurren en la propagación de las ondas

Un concepto estrechamente relacionado con el de la refracción es el del ángulo límite o ángulo crítico. Cuando el ángulo de incidencia de la onda con respecto a la normal es mayor que dicho ángulo, la onda se refleja en vez de refractarse.

La expresión para el ángulo límite es la $\theta_{crit} = \arcsin(n_2/n_1)$, donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios de origen y destino, respectivamente.

Finalmente, pero no por ello menos importante, hay que tener en cuenta que la potencia de una onda electromagnética va disminuyendo mientras se aleja de la fuente con una relación inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

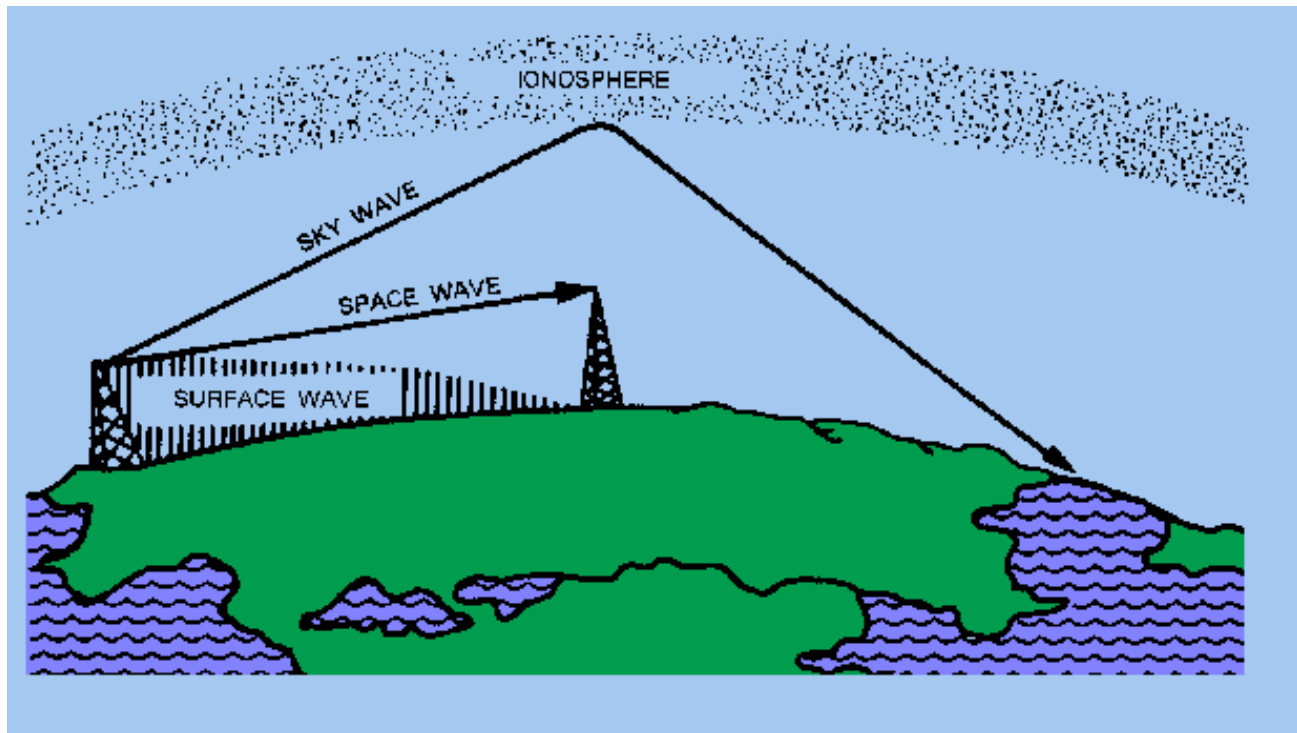


Figura 10: Propagación de ondas

Por otro lado, hay propiedades de la propagación que son fuertemente dependientes de la frecuencia de la onda. Si bien no hay una separación estricta entre cada caso, se suele dividir a las ondas en tres grandes tipos según su forma predominante de propagación:

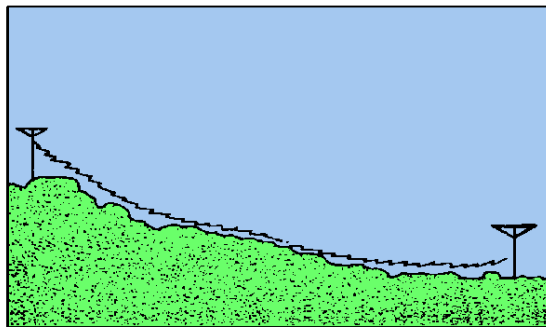
Ondas de tierra (Surface Waves) También denominadas ondas de suelo se caracterizan porque aprovechan las propiedades conductivas del terreno (tierra, agua, etc.) para propagarse, siempre que la frecuencia de emisión se encuentre debajo de los 5 Mhz. De esta manera, son capaces de sortear grandes obstáculos y llegar muy lejos, **con un alcance casi global**. A pesar de su nombre, no es necesario estar en el suelo para poder recibirlas. Se emplea en las mismas polarización vertical para reducir su atenuación al ponerse en contacto con la tierra, Figuras 10 y 11(a).

Este tipo de propagación es predominante en las frecuencias bajas (VLF, LF y MF, principalmente, ≈ 3 MHz), y por ello se requiere de grandes antenas y mucha potencia para emitirlas y recibirlas.

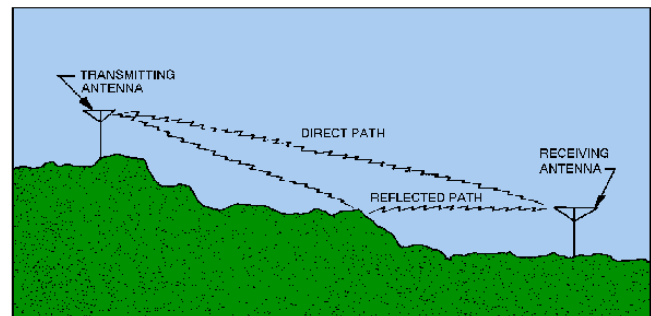
El hecho de que su alcance sea tan grande limita su uso, pues plantea el problema de potenciales interferencias entre estaciones muy lejanas. Asimismo, su trayectoria puede ser difícil de predecir dado que se refractan en las fronteras entre medios diferentes, como por ejemplo las costas (tierra/agua).

También suelen emplearse para comunicaciones a distancias cortas con un rango de frecuencias entre 3-30 MHz.

El Loran-C es una de las pocas radioayudas que utiliza este tipo de ondas.



(a) Ondas de tierra



(b) Ondas de línea de vista

Figura 11: Propagación de ondas

Ondas ionosféricas u ondas de cielo (Skyline Waves) Aprovechan las características eléctricas de la ionosfera para propagarse, usándola como una especie de “espejo”. En realidad, más que una reflexión es una refracción progresiva limitada por el ángulo crítico (lo que implica que cierta cantidad de energía se escapa al espacio). Es predominante en las frecuencias medias: MF y HF.

Evidentemente, una propagación de este tipo se ve fuertemente influenciada por la geometría relativa entre emisor, ionosfera y receptor. Para complicar la situación, la posición y características de la ionosfera son altamente variables, pues dependen del Sol. Por eso, la situación es diferente durante el día y durante la noche, y cambia según la estación del año y el ciclo solar. Adicionalmente, el terminator line¹ (frontera entre el día y la noche) también afecta la propagación, Figuras 10.

Debido a esta compleja situación aparecen “zonas de oscuridad”, es decir, zonas donde no hay recepción porque ninguna onda ha rebotado con la geometría adecuada para proporcionar cobertura. Asimismo, es posible que hayan múltiples rebotes sucesivos (proporcionando un alcance muy largo pero inestable).

Otro problema que presentan estas ondas es el efecto fading: a cierta distancia del emisor, el receptor puede recibir la misma onda pero que ha seguido caminos diferentes (una parte se propagó como onda de tierra y otra como de cielo), ocasionando interferencia destructiva y resultando en una señal que aparece y desaparece rápidamente.

En el ámbito aeronáutico, el ADF/NDB y las comunicaciones de largo/medio alcance utilizan este tipo de propagación.

Ondas de línea de vista (Space Waves) Se propagan en línea recta, de forma análoga a como lo haría la bala de un rifle. Debido a lo anterior, su alcance es limitado y no pueden rodear obstáculos de tamaño medio, Figuras 10 y 11(b).

Esta limitación se convierte en una ventaja dado que entonces es posible reutilizar las frecuencias una y otra vez si los emisores/receptores están lo suficientemente alejados entre sí. Además, las frecuencias altas (VHF y superior) en donde este tipo de propagación predomina son mucho menos susceptibles a la interferencia por causa de estáticos.

¹Se puede entender mejor este concepto mediante el simulador Earth Viewer <http://www.paulcarlisle.net/old/earthviewer.html>

Debido a sus ventajas, la inmensa mayoría de las comunicaciones y aplicaciones aeronáuticas modernas (VOR, DME, ILS, GNSS y un largo etcétera) se hace con ondas de línea de vista.

3. Sistema de Navegación Hiperbólicos

3.1. Introducción

Los Sistemas de Navegación Hiperbólicos son aquellos que utilizan como técnica de localización de la aeronave la intersección de hipérbolas. Son sistemas de largo alcance, utilizados en vuelos intercontinentales o transoceánicos.

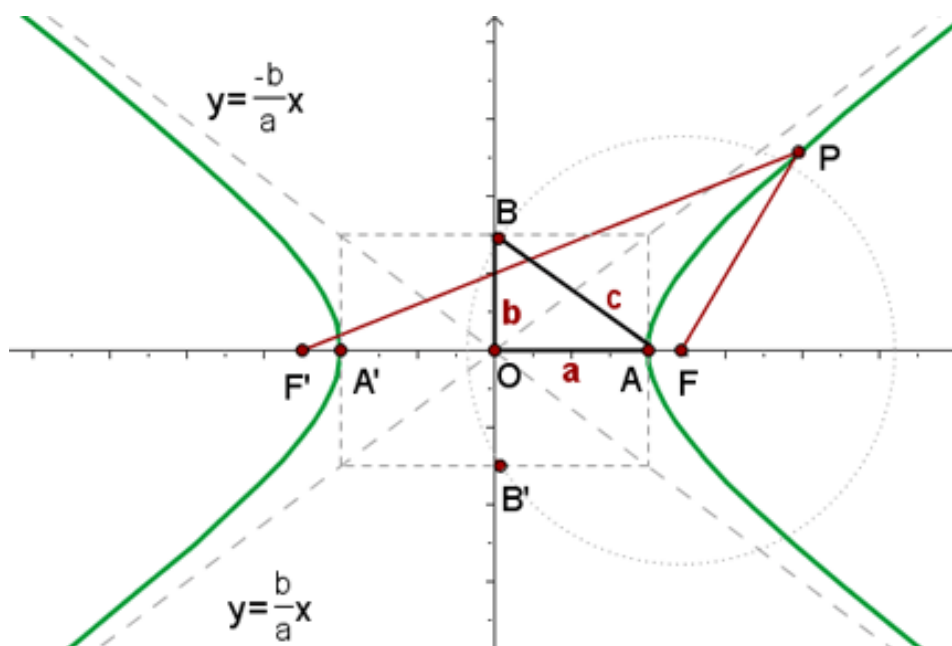


Figura 12: Elementos de una hipérbola

La hipérbola es una de las cónicas (elipse, parábola, hipérbola) y se define como el lugar geométrico de los puntos cuyas diferencias de distancias a dos puntos fijos, denominados focos, es constante. Matemáticamente esto se expresa como:

$$FP - F'P = 2a$$

Donde los puntos F y F' son los focos de la cónica (Figura 12), y $2a$ es la distancia entre los dos vértices de las curvas.

El principio de funcionamiento de los sistemas hiperbólicos se basa en que la aeronave tenga a bordo el equipo necesario para determinar la diferencia de distancias que la separan de dos estaciones fijas situadas en tierra. Para ello se asume que las dos estaciones terrestres, ubicadas en los focos, emiten ondas electromagnéticas en todas direcciones. El punto P que representa a la aeronave, recibe las ondas y determina la diferencia de distancias que la separan de las estaciones terrestres.

De esta manera, el operador a bordo de la aeronave, determina en qué “hipérbola” se encuentra, pero no sabe en qué punto de la misma está ubicado. Para solucionar esto se requiere una hipérbola más, lo que se logra con un sistema de tres estaciones terrestres, a fin de minimizar la indeterminación a dos posibles puntos o tres hipérbolas para localizar la nave en un único punto. Con dos curvas sobra

precisión para la localización ya que, de los dos puntos posibles, uno se desestima por encontrarse muy alejado de la ruta.

Han existido diversos sistemas de navegación hiperbólicos, pero la mayoría no operan actualmente o han sufrido modificaciones. Entre ellos se tiene:

- GEE
- LORAN-A
- LORAN-B
- LORAN-C
- LORAN-D
- DECCA
- OMEGA
- TROPIK
- MARSHRUT
- SHORAN (SHORt Range Air Navigation)

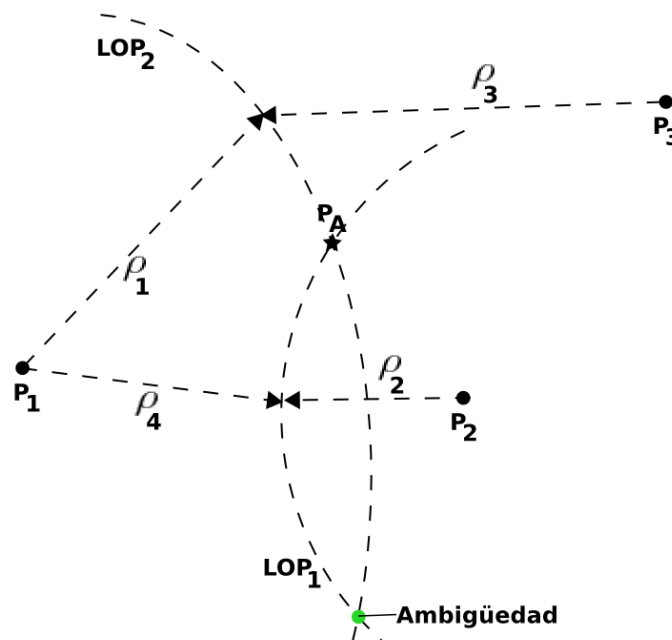


Figura 13: Principio de ubicación de la posición por navegación hiperbólica

3.1.1. Técnicas de navegación hiperbólica

Los sistemas hiperbólicos solo pueden determinar diferencias de distancias, para ello se emplean dos técnicas diferentes:

Técnica de impulsos-tiempos: conociendo la velocidad de las ondas electromagnéticas, c , se puede relacionar el tiempo medido con la distancia recorrida mediante la expresión:

$$\Delta r = c \Delta t$$

De donde:

$$r = r_0 + c (t - t_0)$$

Pero la ecuación encierra una gran dificultad de llevar a la práctica puesto que t_0 implica conocer el momento exacto en que se produjo la transmisión del emisor. Este problema desaparece si se considera, en lugar de una distancia determinada a una estación, una diferencia de distancias a dos estaciones puesto que si ambas transmiten sincronizadas, al efectuarse la diferencia de distancia la incógnita t_0 desaparece.

Para ver con mas detalle lo anterior, considérese una estación emisora maestra, M que empieza su emisión en el tiempo t_0 ; otra estación denominada esclava ubicada a una distancia d de la estación maestra, recibe esta señal luego de un tiempo d/c . Luego de un tiempo τ , denominado “tiempo de sincronismo”, emite una señal idéntica a la recibida.

El receptor en la aeronave (A) recibe las señales emitidas por las emisoras maestra y esclava, calculando la diferencia de tiempo entre ambas $\Delta t = t_2 - t_1$.

Partiendo de la estación maestra en el tiempo t_0 , el impulso tarda un tiempo $t_1 - t_0$ en llegar al receptor de la aeronave:

$$t_1 - t_0 = \frac{r_1}{c}$$

Al llegar el impulso de la estación madre a la esclava, esta luego del tiempo τ , emite el suyo el cual llega en el tiempo t_2 al receptor, de esta forma se tiene:

$$t_2 - t_0 = \frac{d}{c} + \tau + \frac{r_2}{c}$$

Haciendo la diferencia de $t_2 - t_1$ según las expresiones anteriores:

$$t_2 - t_1 = t_0 + \frac{d}{c} + \tau + \frac{r_2}{c} - t_0 - \frac{r_1}{c} = \tau + \frac{d + r_2 - r_1}{c} = \tau + \frac{d + \Delta r}{c}$$

Finalmente:

$$\Delta t = \tau + \frac{d + \Delta r}{c}$$

Esta expresión implica que a cada incremento de tiempo (Δt) le corresponde uno de distancia (Δr), con los parámetros d , c y τ conocidos.

Pero debe recordarse algo, en lugar de considerar hipérbolas que son curvas planas, este método ubica al receptor en un hiperboloide de revolución. Por esto deben hacerse correcciones por la curvatura y forma de la tierra.

Técnica de onda continua-fases: En esta técnica la emisión es de forma continua a diferencia de la anterior que es por pulsos y que el parámetro que se mide es la diferencia de fases.

Se utilizan dos emisores omnidireccionales con un sincronismo de fases entre sus señales. El receptor recibe a ambas señales con una diferencia de fase, que depende de la distancia de la aeronave a cada una de las emisoras. De esta manera se determina la hipérbola donde se encuentra el receptor.

Conociendo la longitud de onda λ se puede obtener la distancia recorrida según la fase medida:

$$\Delta r = \lambda \Delta \phi \implies r = r_0 + \lambda (\phi - \phi_0)$$

Aquí se presenta una dificultad porque el receptor necesita conocer ϕ_0 , la fase exacta en que se produjo la transmisión.

El proceso se realiza de la siguiente forma, la estación maestra ubicada en M emite su señal continua con frecuencia f_1 (longitud de onda λ_1) y origen de fases ϕ_{10} . La estación esclava en E recibe esta señal y transmite la suya con frecuencia f_2 y fase inicial ϕ_{20} . La frecuencia f_2 es diferente de la f_1 para que el receptor pueda separar fácilmente las señales.

La antena de la aeronave recibe ambas señales f_1 y f_2 con fases ϕ_1 y ϕ_2 diferentes a las de salida, cuyos valores son:

$$\phi_1 = \phi_{10} + \frac{r_1}{\lambda_1} \quad \phi_2 = \phi_{20} + \frac{r_2}{\lambda_2}$$

Para poder comparar estas señales se usa el artificio de una frecuencia común, f_c , con longitud de onda λ_c que resulta de multiplicar a cada una de las frecuencias anteriores por un número entero n_1 y n_2 , respectivamente:

$$f_c = n_1 f_1 = n_2 f_2$$

Cuando se multiplica una frecuencia por un número, se hace lo mismo con su fase, por lo que las expresiones anteriores vistas desde esta frecuencia común, quedan:

$$\theta_1 = n_1 \phi_1 = n_1 \phi_{10} + \frac{n_1 r_1}{\lambda_1} \quad \theta_2 = n_2 \phi_2 = n_2 \phi_{20} + \frac{n_2 r_2}{\lambda_2}$$

Restando la diferencia de las fases:

$$\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2 = n_1 \phi_{10} + \frac{n_1 r_1}{\lambda_1} - n_2 \phi_{20} - \frac{n_2 r_2}{\lambda_2}$$

El sincronismo de fase entre la estación maestra y la esclava debe realizarse de forma que se cumpla lo siguiente:

- La diferencia de fases iniciales multiplicadas por su entero respectivo debe mantenerse constante: $n_1 \phi_{10} - n_2 \phi_{20} = cte$
- El ajuste de sincronismo que realiza la estación esclava cumple, en la prolongación de la línea que la une con la maestra pero en el lado de la maestra, que la diferencia de fases en la aeronave sea nula:

Para $r_1 = 0$ y $r_2 = d$ se cumple que $\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2 = 0$

Sabiendo que para un lado se cumple $c = f_c \lambda_c = f_1 \lambda_1$ y como $f_c = n_1 f_1$, entonces $n_1 f_1 \lambda_c = f_1 \lambda_1$, por lo que $n_1 \lambda_c = \lambda_1$ o $\frac{n_1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda_c}$.

De la misma manera se obtiene $\frac{n_2}{\lambda_2} = \frac{1}{\lambda_c}$.

Volviendo a la diferencia de fases de la frecuencia común:

$$\Delta \theta = n_1 \phi_{10} - n_2 \phi_{20} + \frac{n_1 r_1}{\lambda_1} - \frac{n_2 r_2}{\lambda_2} = cte + \frac{\Delta r}{\lambda_c}$$

Trabajando con la expresión anterior se llega a que:

$$\Delta\theta = \frac{d + \Delta r}{\lambda_c}$$

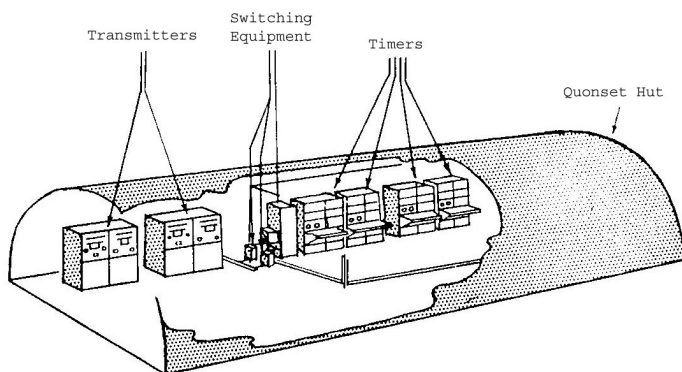
Surge un problema adicional, esta expresión solo resuelve el incremento de fase dentro de una longitud de onda determinada pero se desconoce dentro de cual. Esto resulta en una indeterminación múltiple, ya que el ángulo real será un número entero de longitudes de onda más el desfase obtenido de la ecuación anterior. La indeterminación será mayor cuanto mayor sea la frecuencia de la señal radiada (menor λ). El inconveniente se soluciona con otra técnica conocida como del número de longitudes de onda completas.

3.2. LORAN

El **LORAN** (del inglés **LO**ng **RA**nge Navigation, navegación de largo alcance) es un sistema de ayuda a la navegación electrónica de tipo hiperbólico de largo alcance, que opera en baja y media frecuencia.

Utiliza el intervalo transcurrido entre la recepción de señales de radio transmitidas desde tres o más transmisores para determinar la posición del receptor.

Desarrollado a principios de la II Guerra Mundial, el LORAN fue el primer sistema de navegación basado en la llegada diferenciada de señales de radio. Fue concebido por el laboratorio de Radiación de MIT. LORAN fue, también, el primer sistema de posicionamiento capaz de funcionar bajo cualquier condición climatológica pero es solamente bidimensional (latitud y longitud).



(a) Interior de la instalación emisora

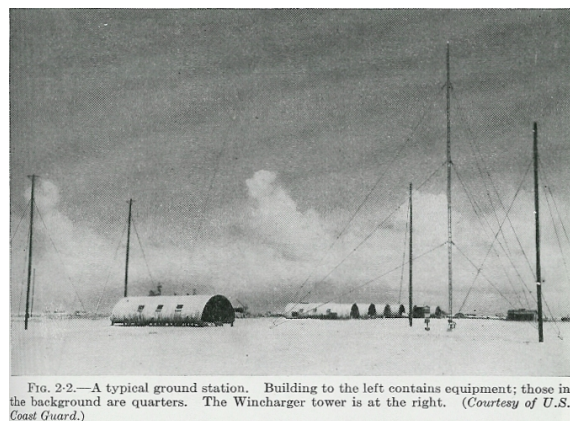


FIG. 2-2.—A typical ground station. Building to the left contains equipment; those in the background are quarters. The Wincharger tower is at the right. (Courtesy of U.S. Coast Guard.)

(b) Vista de estación emisora

Figura 14: Instalaciones de LORAN-A [1]

El sistema emisor LORAN se compone de una estación maestra y otra esclava. La maestra emite de forma regular una pequeña señal, que es repetida por la esclava, controlada por radio desde la maestra. Ambas señales se reciben en el barco o avión, se amplifican y se registran como pequeñas ondas sobre la pantalla de un tubo de rayos catódicos. Los circuitos del receptor están dispuestos de forma que la distancia entre las señales corresponda a la diferencia de tiempos de llegada de las señales de ambas estaciones. El receptor posee además un dispositivo temporizador electrónico que permite medir dicha diferencia en microsegundos (millonésimas de segundo).

Como las ondas de radio viajan a una velocidad aproximadamente constante de 300000 km/segundo, la ubicación de todos los puntos en los que las señales de las dos estaciones están separadas un

determinado intervalo de tiempo se puede representar mediante una curva concreta que es una hipérbola (Figura 15). El navegante dispone de un mapa con muchas de estas curvas, denominadas curvas de posición LORAN, y tras determinar la diferencia de tiempos, por ejemplo, 3 microsegundos, sabe que la posición de su nave se halla en algún punto de la curva de 3 microsegundos del mapa. Sintonizando una pareja de emisores LORAN y repitiendo este proceso, el navegante es capaz de detectar otra curva que represente la posición de la nave; la posición real del aparato se halla en la intersección de las dos curvas LORAN.

Este sistema posee un alcance útil de unos 2592,8 km (1400 nm) por la noche y unos 1296,4 km (700 nm) de día. Las señales se emiten generalmente en la banda de frecuencias de 1,8 a 2,0 MHz. Sirve tanto para marcar y mantener un rumbo, como para fijar la posición, y presenta la ventaja de ser independiente de las condiciones meteorológicas. Su exactitud oscila entre unos centenares de metros y unos pocos kilómetros, dependiendo del equipo utilizado y de la distancia entre la nave y la emisora.

La versión más moderna es LORAN-C que funciona en frecuencias del espectro electromagnético entre 90 y 100 KHz. El sistema LORAN es utilizado en muchos países, entre ellos los Estados Unidos de América, Japón y varios países europeos. Rusia utiliza un sistema casi idéntico llamado CHAYKA, que usa la misma banda de frecuencias.

El uso de LORAN está decayendo rápidamente siendo reemplazado por GPS. Sin embargo, se está estudiando la posibilidad de mejorar y volver a popularizar el LORAN.

3.3. DECCA

El sistema de navegación DECCA es un sistema hiperbólico de posicionamiento basado en señales de radio de onda continua en el rango de frecuencias de los 70 a los 130 KHz. Su uso puede aplicarse tanto en entornos marítimos, aéreos y terrestres. El sistema consta de estaciones emisoras en tierra situadas en localizaciones conocidas que crean líneas de posición hiperbólicas. El alcance del sistema depende de varios factores pero normalmente es del orden de 240 millas marítimas (unos 440 Km) durante la noche y el doble de esta distancia por el día. Una cadena de estaciones DECCA consta de una estación central Master, a la que se asocian las tareas de supervisión, control y monitorización de la cadena, junto con tres, en algunos casos dos, estaciones esclavas alejadas a unos 80-110 Km. de la Master.

Inventado en América por Wiilian J.O'Brien, pero desarrollado por la empresa londinense "DECCA Radio and Televisión, Ltd.", el sistema DECCA se usó inicialmente para dirigir el rumbo de los dragaminas durante el desembarco de Normandía en la Segunda Guerra Mundial. El DECCA comenzó a transmitir el 5 de junio de 1944. En 1975, Mr H. Schwarz, el director general de la Compañía DECCA Navigator, admitió que el Loran-C era probablemente mejor que el DECCA en navegación aérea y que la navegación por satélite era posiblemente mejor que ambos. Ante la competencia del sistema GPS, DECCA suspendió su servicio entre los años 2000 y 2001.[3]

3.3.1. Funcionamiento

Para poder determinar exactamente la posición de un móvil en el espacio el Sistema DECCA necesita usar al menos tres estaciones transmisoras en tierra. Este conjunto de estaciones transmisoras son lo que conocemos como "Cadena DECCA".

Cada cadena dispone de una estación Master y de tres, en algunos casos dos, estaciones Esclavas, a las que se denominan correspondientemente con los nombres de Roja, Verde y Púrpura. Entre la estación Master y cada estación Esclava se crea un haz iperbólico que es la representación gráfica de las diferencias de fase existentes entre las emisiones de cada par de estaciones transmisoras. De

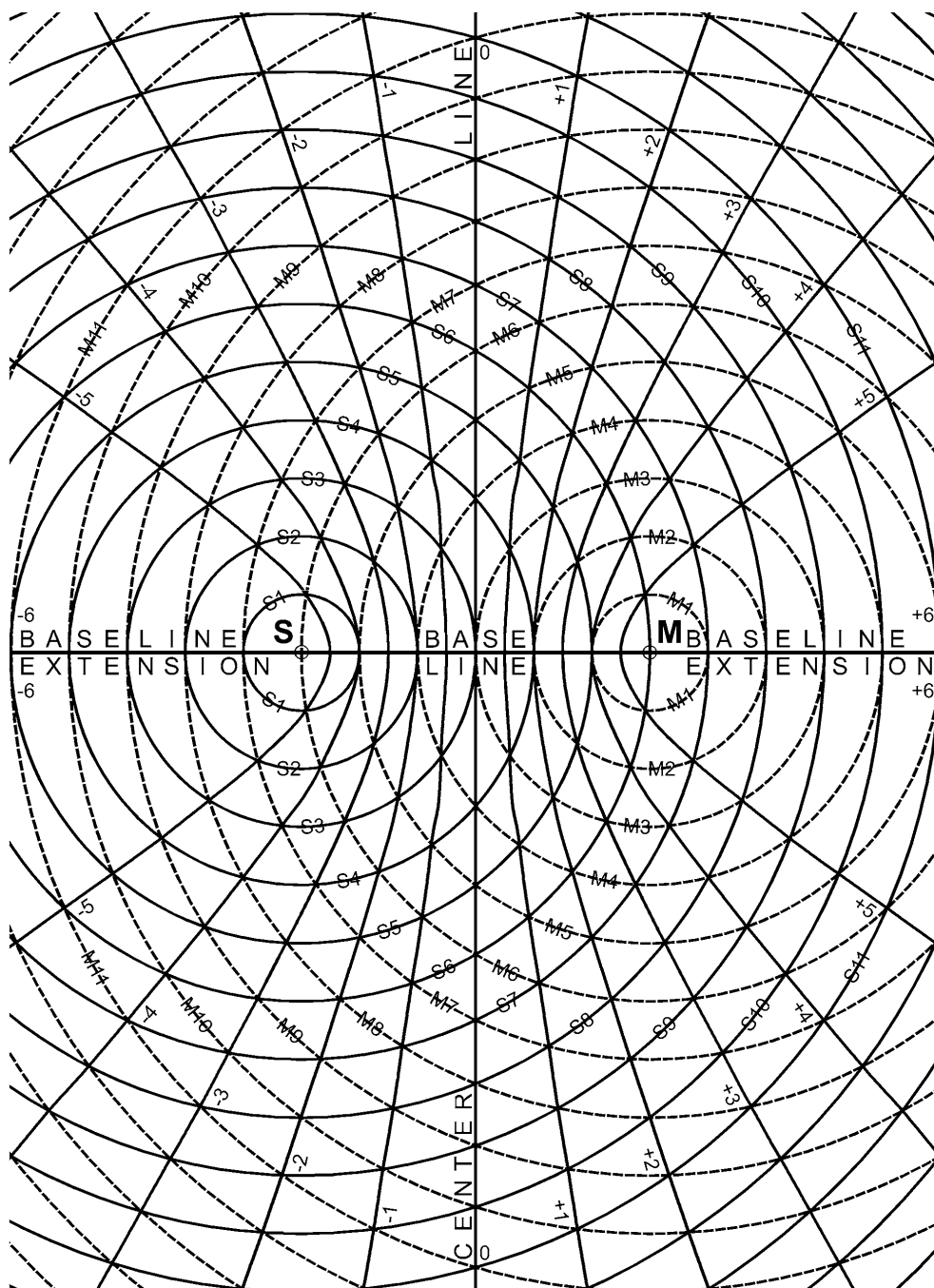


Figura 15: Mapa de hipérbolas del sistema LORAN [?]

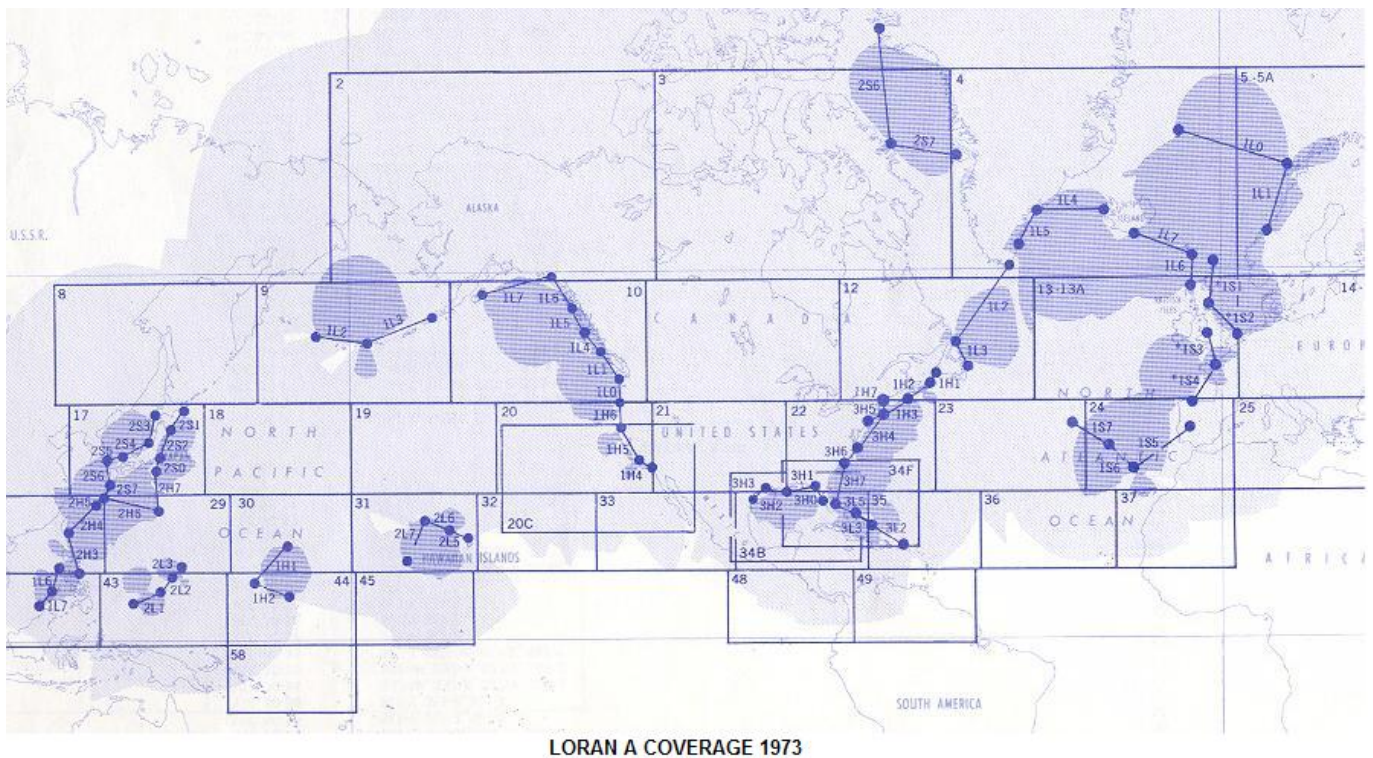


Figura 16: Cobertura LORAN-A Año 1973 [?]

este modo un aparato Receptor que reciba las emisiones de las estaciones puede hallar y mostrar de forma exacta la posición de cualquier móvil en un momento determinado, ya que la posición será el punto de intersección de, al menos, un par de hipérbolas.

Para que esto suceda primero debemos crear un patrón o haz hiperbólico entre la estación Master y cada una de las Esclavas.

El sistema hace uso de frecuencias diferentes para cada una de las estaciones transmisoras, pero todas ellas están armónicamente relacionadas (son proporcionales), es lo que conocemos como armónicos. Toda Cadena DECCA dispone de una frecuencia fundamental no modulada que no es transmitida conocida como f . Está frecuencia se encuentra en la banda de los 14 kHz. La estación Master transmite a $6f$, la Esclava Púrpura a $5f$, la Esclava Roja emite a $8f$ y la Esclava Verde lo hace a $9f$. Al ser señales de onda continua es suficiente espaciarlas 180Hz para evitar interferencias.

Para crear el patrón o haz hiperbólico entre un par Master-Esclava las estaciones deben estar sincronizadas en fase y en frecuencia.

Aunque las estaciones no emiten a la misma frecuencia (el Receptor no sería capaz de distinguir entre las señales de las Esclavas y de la Master), todas emiten en múltiplos de la frecuencia fundamental. Para crear el patrón o haz hiperbólico necesitamos que las ondas emitidas sean de la misma frecuencia, esto lo conseguimos “virtualmente” en el Receptor ya que después de multiplicar convenientemente cada frecuencia, se comparan siempre a una misma frecuencia final ($24f$ para el par Master-Roja, $18f$ para el par Master-Verde y $30f$ para el par Master-Púrpura). El resultado final es que el Receptor calcula las diferencias de fase como si cada estación emitiese a la misma frecuencia.

Una vez creado el patrón o haz de hipérbolas en cada par Master-Esclava el Receptor DECCA puede determinar la posición al comparar la diferencia de fases entre cada par Master y Esclava. Las diferencias de fase medidas en el Receptor se representan en los decímetros. Las lecturas de los decímetros son trasladadas manualmente a una Carta de navegación DECCA donde están representadas gráficamente las hipérbolas, cada una con su color correspondiente (Rojo, Verde y Púrpura).

El punto de intersección de al menos dos hipérbolas (tres para conseguir mayor exactitud) nos da nuestra posición.

Un Receptor DECCA en su versión más simple se presenta en la Figura . En el diagrama de bloques podemos ver los filtros, multiplicadores y discriminadores que hacen posible las lecturas de los decómetros. Los Receptores filtran la señal procedente de cada Esclava y de la Master. Estas señales son multiplicadas convenientemente para poder compararlas a la misma frecuencia en los discriminadores (virtualmente es como si las estaciones emitiesen a la misma frecuencia). Estos cálculos son los que se representan en los decómetros.

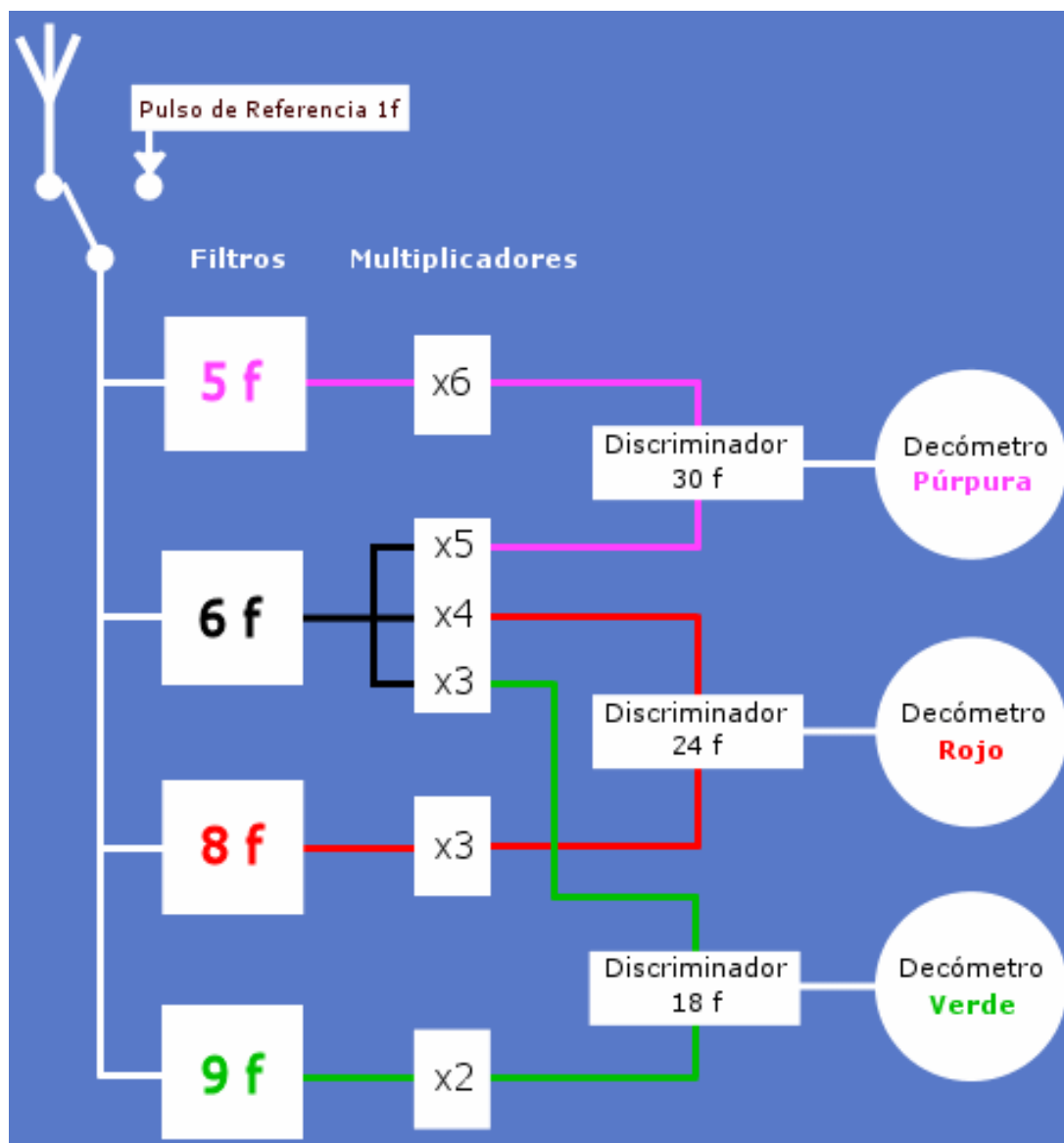


Figura 17: Diagrama de Bloques de un receptor DECCA en su versión más simple (sin indicador de calle). La señal de cada estación Esclava y de la Master es captada, filtrada y multiplicada para poder hacer la comparación de fase en los discriminadores a una misma frecuencia. Los calculos realizados en los discriminadores se representan finalmente en los decómetros.

Para calcular la diferencia de fase, y por tanto la línea de posición, el Receptor hace uso de la siguiente fórmula:

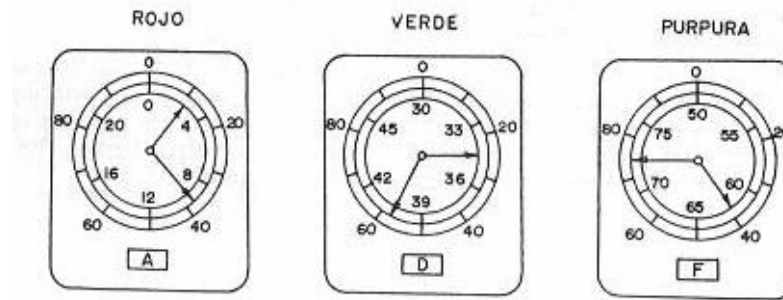


Figura 18: Receptor DECCA

$$\Delta\phi = \frac{2\pi (S + r a - r b)}{\lambda}$$

Donde se considera que A y B son un par de estaciones transmitiendo sincronizadamente que emiten ondas continuas de idéntica frecuencia y fase.

- $r a(r b)$ es la distancia a la estación A(B).
- λ es la longitud de onda de la frecuencia común.
- S es la distancia entre las dos estaciones.

El lugar de los puntos de un plano en el que $rA - rB$ es una constante se representa gráficamente mediante una hipérbola de focos A y B. Lo que constituye una línea de posición para la navegación si la localización de las estaciones es conocida y el usuario dispone de un equipo comparador de fase. El medidor de fase o decómetro no puede distinguir diferencias de fase múltiplos de 2π (360°) por eso el rotor del decómetro (que realiza un giro completo por cada 360° de fase) esta conectado mediante un engranaje a la aguja principal que avanza una posición cada vez se recorre el espacio comprendido entre dos hipérbolas en fase. Por convencionalismo el rotor del decómetro avanza en el sentido de las agujas del reloj en dirección hacia la Esclava. El espacio comprendido entre dos hipérbolas en fase se denomina Calle o ruta DECCA (DECCA Lane). Conectado al rotor de calle hay otro rotor calibrado en centésimas de calle. En la práctica una carta DECCA consta de varios cientos de calles que se agrupan en Zonas designadas alfabéticamente por letras de la A a la J.

La antena transmisora es normalmente una torre de 100 metros. La potencia del transmisor era de 1,2 kW a cada frecuencia, pero dada la corta longitud de la antena en comparación con longitud de onda, la potencia radiada era de 100 a 200 W.

La exactitud del sistema DECCA depende en gran medida de la posición del usuario con respecto a las estaciones transmisoras, así como de la época del año y de la hora del día. La desviación estándar del error en el DECCA se medía habitualmente en centésimas de calle. Los errores de día oscilaban entre unos pocos de metros, por contra de noche los errores eran mayores llegando hasta millas. En cuanto al alcance de las estaciones transmisoras, era de 740 km por el día y 460 durante la noche. El alcance se suele definir como la distancia a la cual las reflexiones de la ionosfera alcanzan el mismo nivel de intensidad que la onda de superficie.

El uso de un receptor DECCA en la cercanía de la costa era una fuente de errores debido a la presencia de montañas, puentes o líneas de alta potencia, que podían provocar reflexiones que hacen que el camino de propagación no sea el más corto.

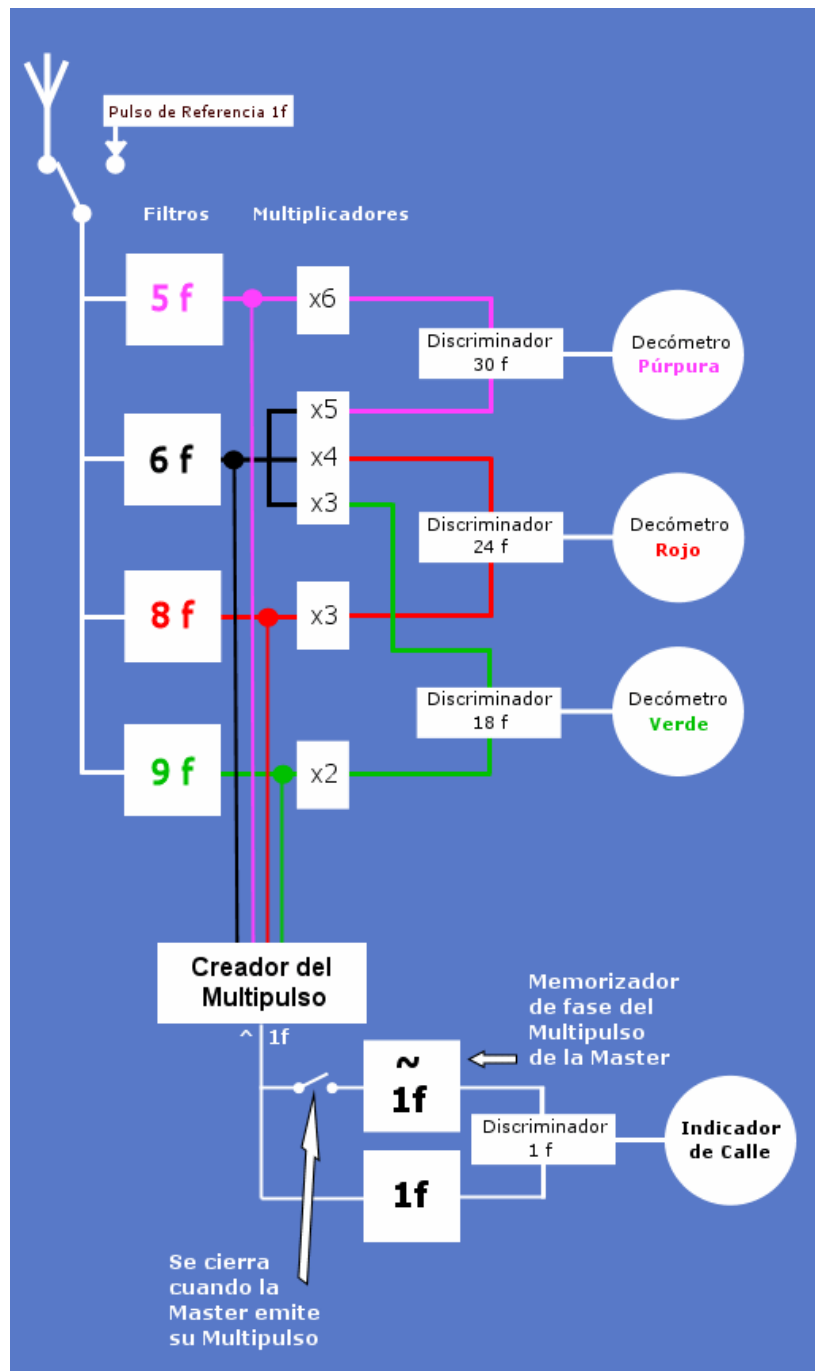


Figura 19: Diagrama de Bloques de un receptor DECCA preparado para el Multipulso (Indicador de Calle). Las emisiones de todas las estaciones se suman en el creador del Multipulso consiguiendo una forma de onda que tiene como característica dominante un corto impulso redundante de frecuencia f . Durante la transmisión Multipulso (MP) de la Master el receptor memoriza la fase de la transmisión y la compara dando como resultado 0. En las demás emisiones se compara la fase del MP de cada estación con la fase MP memorizada de la Master, creandose así un haz o patrón hiperbólico que por cada ciclo de diferencia de fase agrupa a 18 calles verdes, 24 rojas y 30 púrpuras. Las diferencias de fase se representan en el Indicador de Calle.

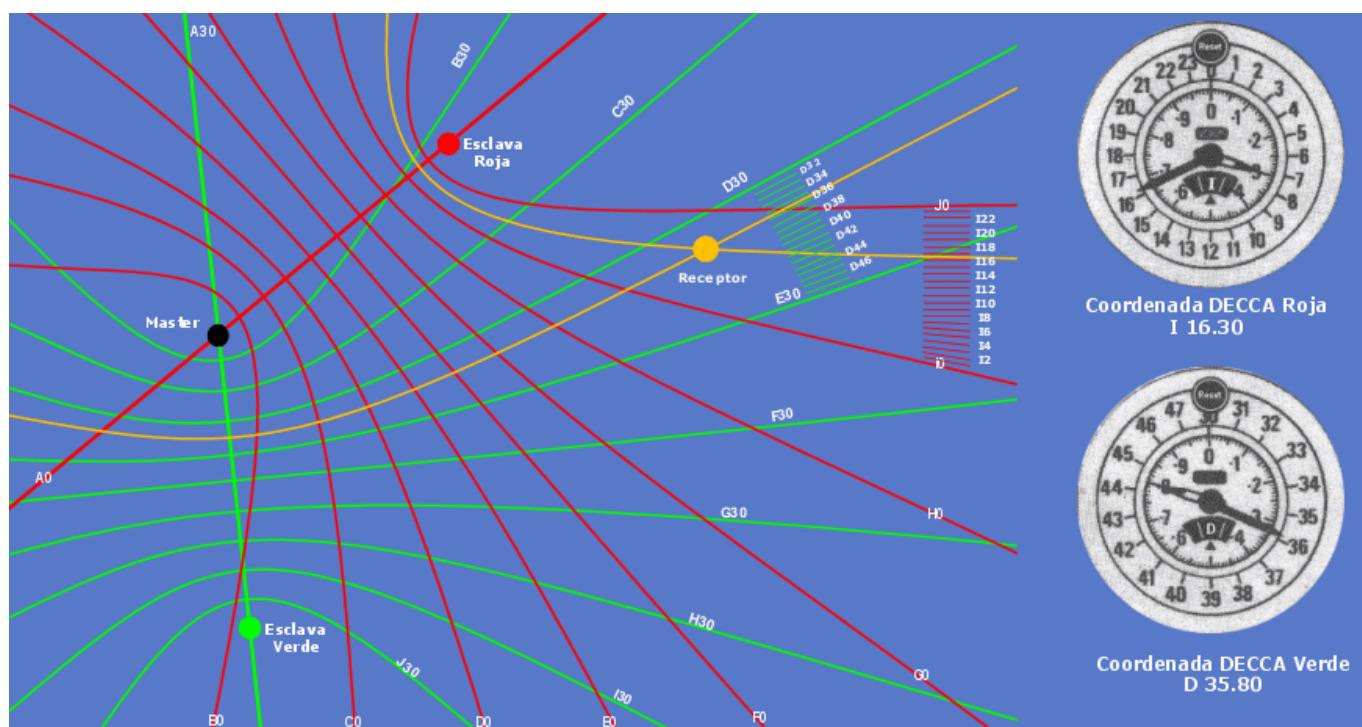


Figura 20: Carta DECCA Simplificada en la que se representa como las lecturas de un par de decómetros nos indican nuestra posición.

4. ADF

4.1. Introducción

- El ADF (Automatic Direction Finder), es uno de los sistemas de radio navegación mas antiguos, está compuesto por un equipo llevado a bordo de la aeronave y otros en tierra.
- La función del ADF es indicar al piloto la dirección en la cual se encuentra una radioayuda NDB (o radioemisora) dada.
- La NDB (Non-Directional Beacon) es la correspondiente radioayuda en tierra que se sintoniza, mientras que el ADF es el equipo a bordo de la aeronave. El ADF puede utilizar señales de otras fuentes, como radioemisoras comerciales.
- A nivel mundial, se utiliza el ancho de banda entre 200 kHz y 1750 kHz (aunque los límites pueden variar un poco según el lugar). En Europa los NDB típicamente se encuentran en las sub-bandas 255-415 y 510-525 kHz.
- Este rango de frecuencias coloca al sistema en el reino de la MF (Medium Frecuencias), existiendo ondas ionosféricas (o de cielo) y ondas de tierra. Estas últimas son capaces de llegar a largas distancias y sobrepasar obstáculos.
- Correspondientemente, la longitud de onda es bastante grande comparada con las dimensiones de una aeronave: $f = 200 \text{ kHz} - \lambda = 1500 \text{ m}$, y $f = 1750 \text{ kHz} - \lambda = 171,429 \text{ m}$.
- La señal se emite en AM (amplitud modulada), enviándose la identificación de la estación en código Morse (para los NDB) o música y sonidos en el caso de las radioemisoras comerciales.

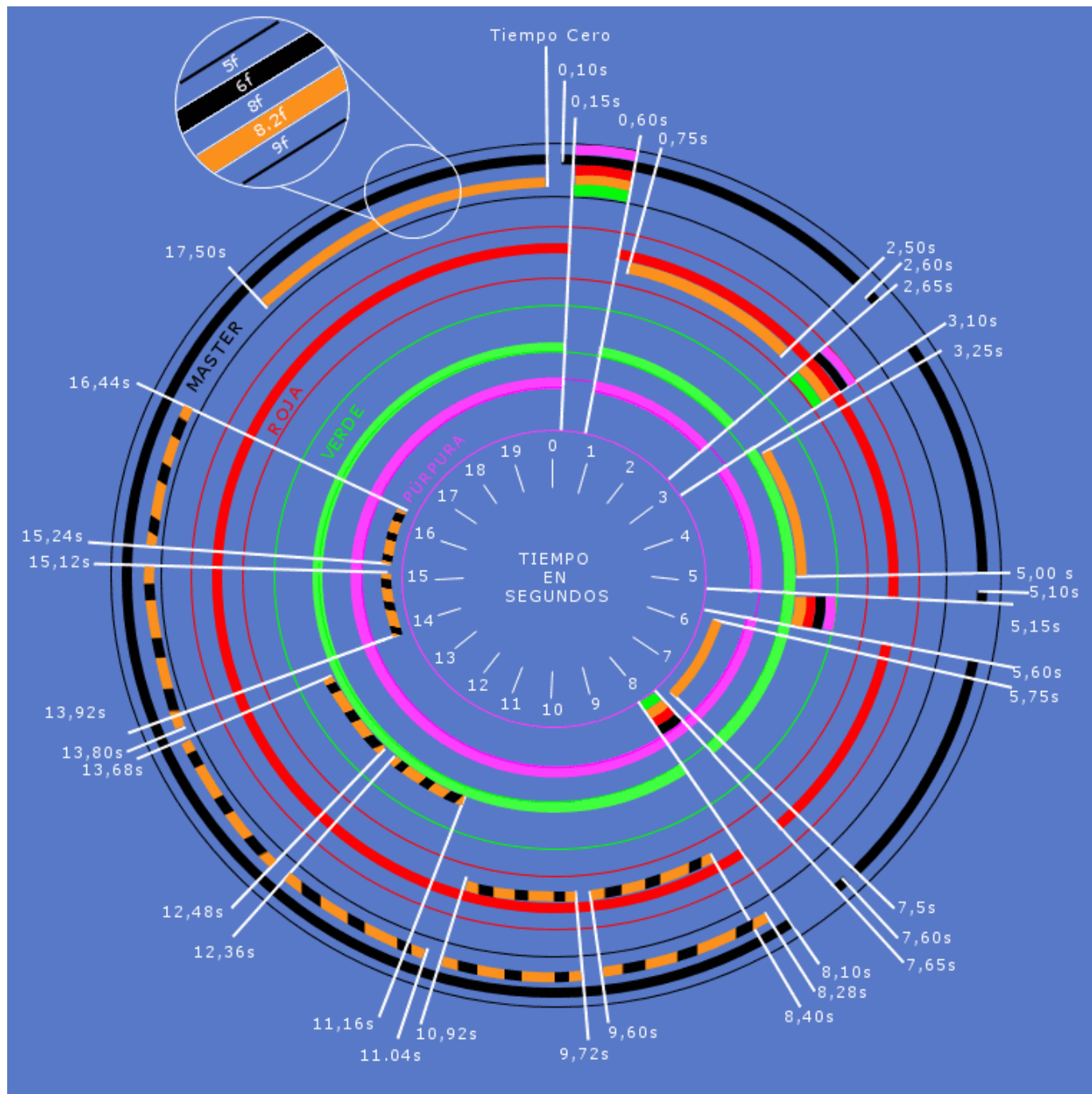


Figura 21: Secuencia de transmisión de 20 segundos de una Cadena DECCA Multipulso. De los 0,15s a los 1,60s podemos observar como la Master emite todas las frecuencias (Multipulso Master). El multipulso de la Roja es de los 2,65s a los 3,10s, el de la Verde de los 5,15 a los 5,60 segundos y el Púrpura de los 7,65s a los 8,10s. Las emisiones Naranjas son del tipo 8.2f. Las naranjas con franjas negras (8.2f) son transmisiones de comandos y datos para control y supervisión de la cadena.

- El alcance es de 25 a 100 NM (46,3 a 185,2 km), puede ser mayor, pero aparecen problemas.
- La intensidad de campo requerida es de 70 microVoltios/m, con S/N ≥ 15 dB.
- La precisión media obtenida es de 3 a 5 grados en condiciones normales de operación.

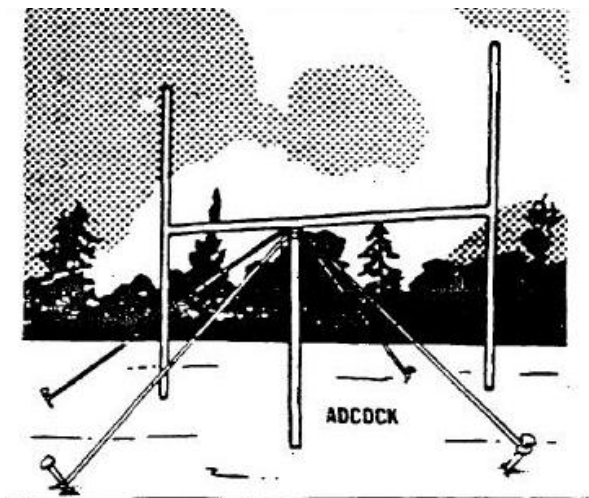
- La polarización es vertical (campo eléctrico en la dirección “z”), con propagación horizontal.

4.2. Antena de cuadro

La antena de cuadro (también llamada antena loop), es una evolución de las antenas “Adcock” que consiste en dos antenas verticales aisladas conectadas en contrafase, ver Figura 22(a).

La antena de cuadro tiene las antenas verticales conectadas entre sí y está hecha de varias vueltas de hilo conductor para mejorar sus propiedades de recepción, como se muestra en la Figura 23(a).

Las dos secciones verticales de la antena son las que reciben señal, son paralelas entre sí y están conectadas en “contrafase”, lo que significa que lo que reciben se resta entre sí y lo que sale es la diferencia.



(a) Antena Adcock



(b) Antigua antena de cuadro ubicada en la parte baja del fuselaje de un DC3

Figura 22: Antenas

4.3. Radiogoniómetro

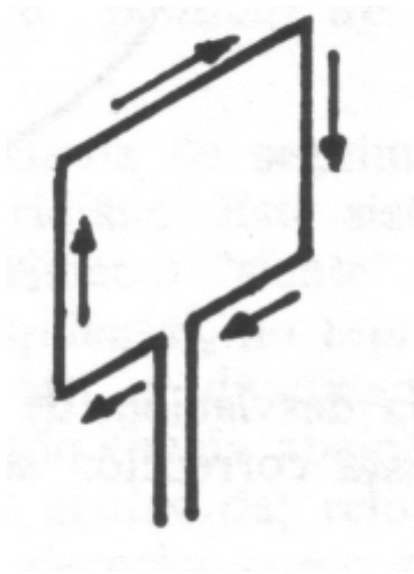
La evolución del ADF ha sido en fases. La primera de ellas fue el radiogoniómetro, que hallaba la dirección en la cual se encontraba una estación emisora en tierra, pero NO lo hacía de manera automática.

Este instrumento tenía una antena de cuadro que podía girarse manualmente desde la cabina, como la mostrada en la Figura 22(b).

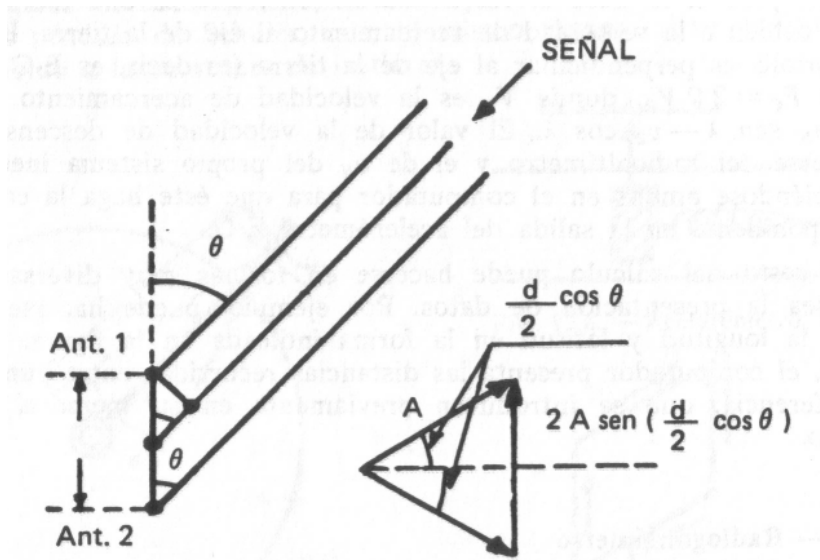
El siguiente dibujo representa una antena de cuadro cuyo plano está inclinado un cierto ángulo θ con respecto al origen de la señal:

En la Figura 23(b) se puede apreciar claramente que debido a que la “Antena 1” (Ant. 1 en la figura) y la “Antena 2” (Ant. 2) están separadas una cierta distancia y, además, existe un ángulo entre la señal que llega y el plano que une las antenas (θ), la primera recibe la señal antes que la segunda. Por esto existe un desfase entre ambas, y por tanto una diferencia (la salida de la antena de cuadro NO es cero en este caso).

En la Figura 24(a) se ilustra la forma de las señales recibidas por la antena 1 (y_1), la antena 2 (y_2) y la diferencia entre ellas ($y_3 = y_2 - y_1$), que es realmente la salida de la antena de cuadro.

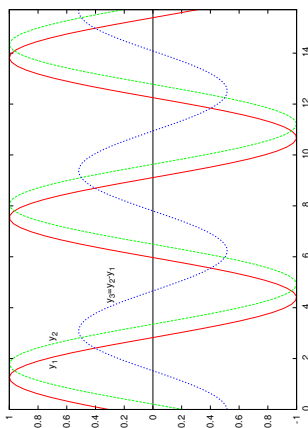


(a) Antena de cuadro [2]

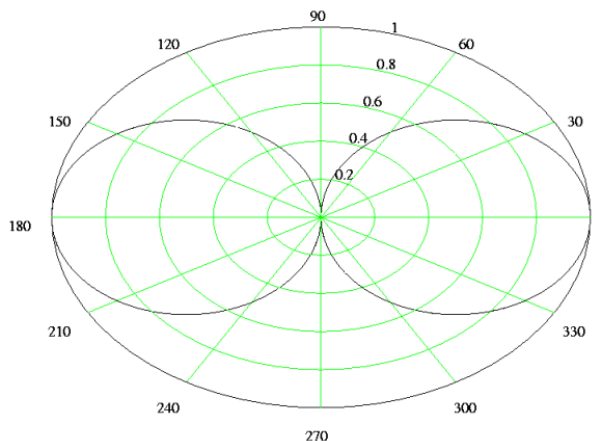


(b) Recepción de la señal por la antena de cuadro [2]

Figura 23: Antena de cuadro



(a) Señales recibidas por la antena de cuadro



(b) Señales recibidas por la antena de cuadro

Figura 24: Esquemas funcionamiento antena de cuadro

En la Figura 24(b) se muestra un diagrama de recepción de estas antenas, el resultado es una figura de “ocho”, donde la recepción es mayor cuando la señal llega paralela al plano de la antena de cuadro, y nula cuando viene perpendicularmente.

Esta característica es aprovechada para hallar la dirección de donde proviene la señal. El “radionavegante” a bordo del avión tenía en su panel de control una ruedecilla (acoplada a un indicador de dirección) con la que podía girar a voluntad (y manualmente) la antena de cuadro, mientras simultáneamente escuchaba con sus audífonos la señal de audio proveniente del emisor (NDB o estación de radio comercial).

Cuando el radionavegante dejaba de escuchar la señal significaba que el plano de la antena de cuadro estaba perpendicular a la dirección en la cual se encontraba el emisor, tomando nota de dicha dirección

(mostrada en el indicador) y marcándola en su carta de navegación.

El método anterior encuentra la dirección pero *existe una ambigüedad en el sentido*, pues el emisor puede estar a un lado u otro del plano de la antena de cuadro. Esta ambigüedad era resuelta tomando otros emisores como referencia, y hayando la intersección de las direcciones, o llevando un registro cuidadoso de la trayectoria del avión desde el inicio del vuelo.

En la Figura 25 se ilustra el diagrama de bloques del radiogoniómetro.

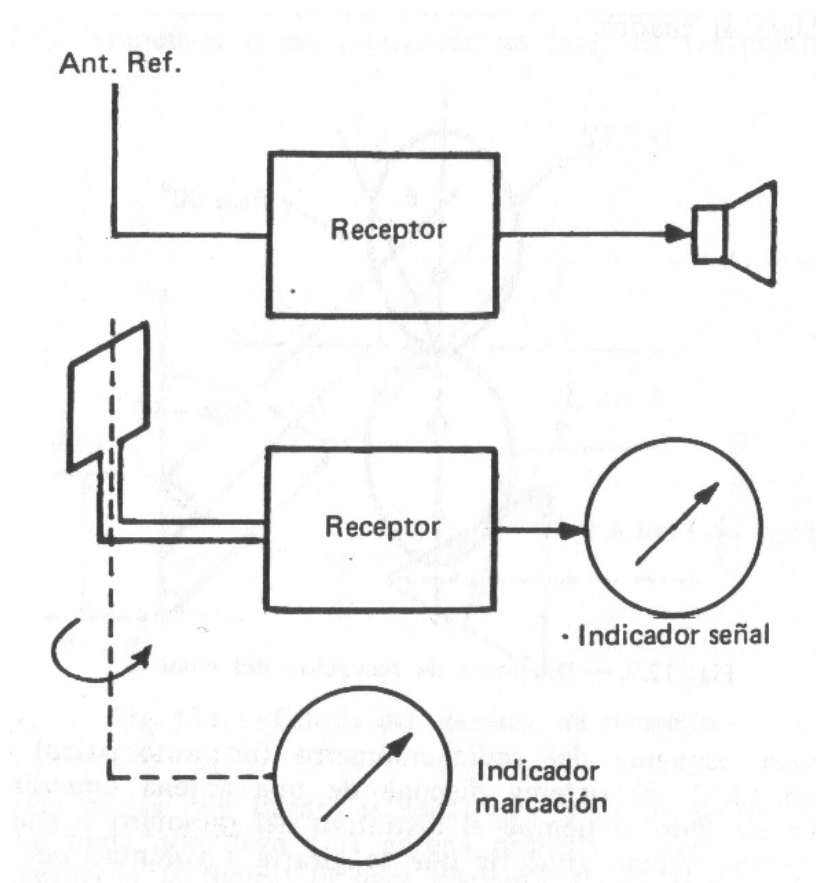


Figura 25: Diagrama de bloques del radiogoniómetro

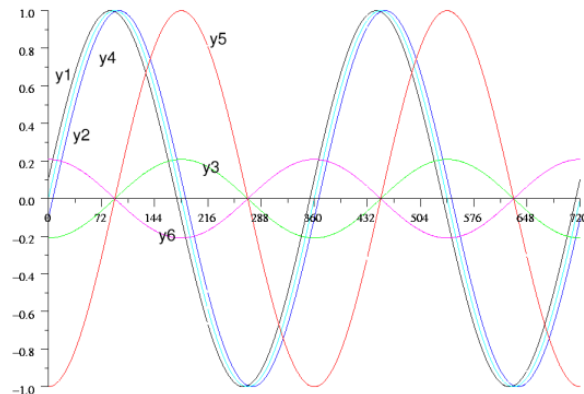
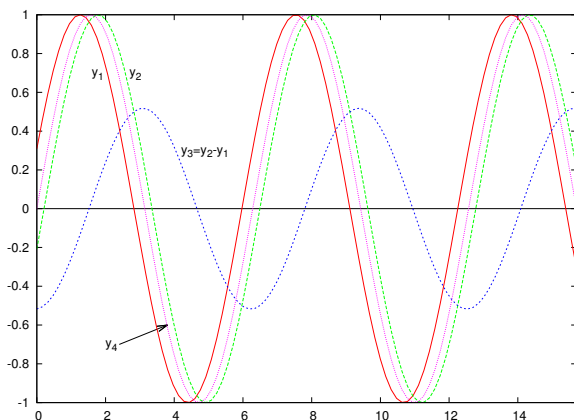
En un circuito aparte, alimentado por una “*antena de referencia*”, proporciona una señal en el sistema de audio que no está sometida a las variaciones de amplitud que implica el cambio de dirección de la antena de cuadro.

4.4. ADF

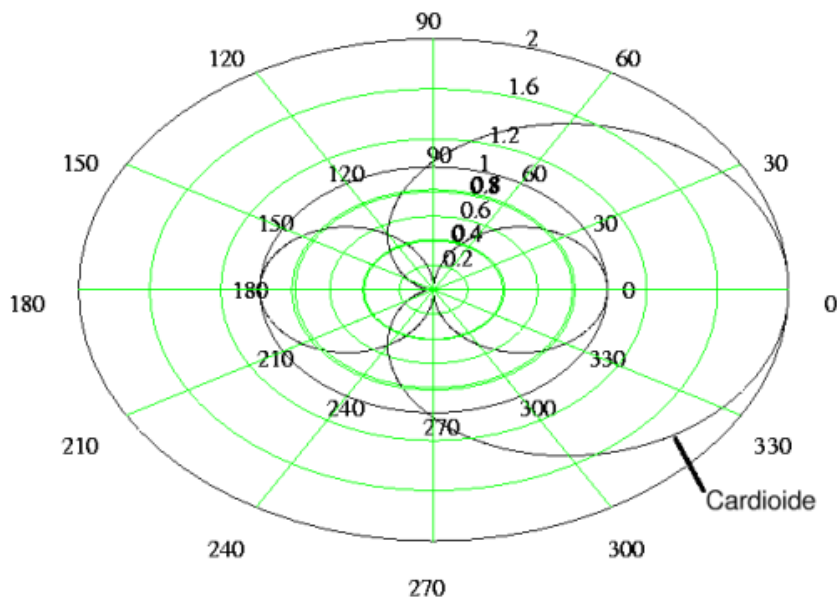
La diferencia principal entre el radiogoniómetro y el ADF es que este último es *automático*, como lo indica su nombre. Esto indica que la ambigüedad en el sentido debe resolverse dentro del propio equipo.

Para ello, se instala una antena de referencia que, por comodidad, se representará en el centro de la antena de cuadro. La señal recibida por esta antena se considera que no tiene desfase y al graficarla en el tiempo (y_4) estará entre y_1 y y_2 .

Si la señal de referencia se desfasa 90° (ver curva y_5), podemos apreciar que prácticamente entra en fase con y_3 , que es la salida de la antena de cuadro cuando la antena 1 está más cerca del emisor que



(a) Señales recibidas por la antena de cuadro + señal de referencia.
(b) Señales antena de cuadro + referencia + referencia desfasada 90°.



(c) Diagrama de recepción antena de cuadro + antena de referencia.

Figura 26: Señales recibidas por la antena de cuadro

la antena 2. Correspondientemente, y_5 estará en contrafase con y_3 si es la antena 2 la que está más cerca del emisor ($y_6 = y_1 - y_2$). Lo anterior se representa en la Figura 26(b).

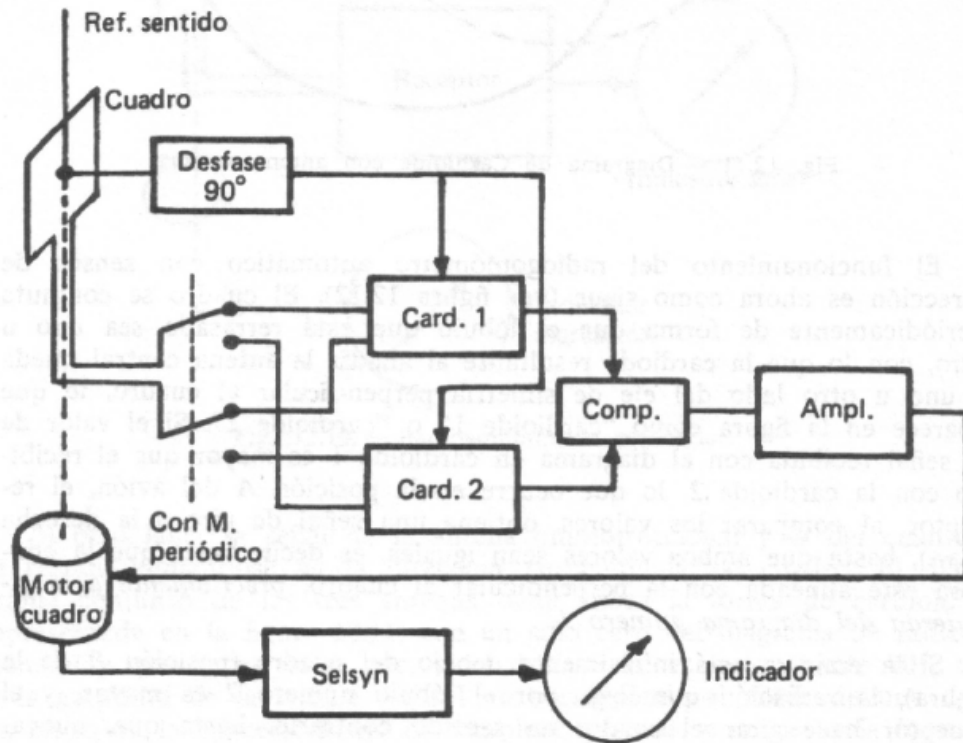
Esta característica de la recepción se aprovecha para determinar el sentido en el que se encuentra el sector y así resolver la ambigüedad que padecía el radiogoniómetro. Si se hace un diagrama de recepción de la combinación antena de cuadro + antena de referencia, se obtiene una *cardioide*.

Entonces, la señal de la antena de cuadro es introducida alternativamente a dos combinadores que generan 2 cardioides: Uno recibe y_3 ($y_2 - y_1$) y el otro y_6 ($y_1 - y_2$). Éstos a su vez también reciben y_5 y la salida de ambos alimenta a un comparador.

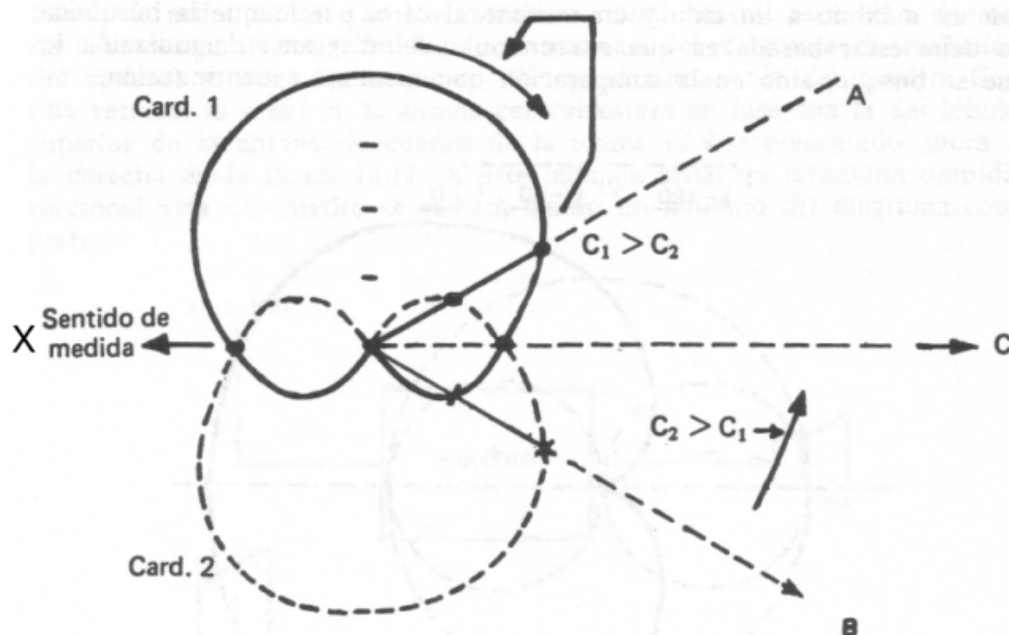
El resultado de la comparación es amplificado y alimenta a su vez al motor que mueve el cuadro. Este motor girará en un sentido u otro según el signo de la comparación, dejando de mover la antena cuando la señal de ambas cardioides es igual. Un acoplador "selsyn" conectado al motor del cuadro

transmite la señal hasta un indicador en la cabina de vuelo.

Esto se visualiza mejor con un diagrama de bloques del sistema presentado en la Figura 27(a).



(a) Diagrama de bloques del ADF con antena rotatoria



(b) Diagrama de bloques del ADF con antena rotatoria

Figura 27

El siguiente esquema muestra las cardioides que el comparador está recibiendo de los combinadores

y cómo el sistema reacciona según cada caso, ver Figura 27(b).

Para explicar estas reacciones vamos a estudiarlas por casos, siempre teniendo en cuenta que la flecha denotada como “*Sentido de la medida*” representa la flecha del indicador:

Emisor en posición A: En este caso, la cardioide 1 (C_1) es mayor que la cardioide 2 (C_2), lo que hace que el comparador emita una señal al motor del cuadro que hará rotar al conjunto COMO LAS AGUJAS DEL RELOJ (unos 150° en este caso) hasta que la flecha apunte hacia “A”. Cuando se llegue a ese punto, $C_1 = C_2$ y se detendrá el movimiento.

Emisor en posición B: Ahora el comparador hallará que $C_2 > C_1$, y por tanto dará al motor del cuadro la orden de giro AL CONTRARIO DE LAS AGUJAS DEL RELOJ hasta que la flecha apunte hacia “B”, lugar en donde se detiene el giro porque $C_1 = C_2$.

Emisor en posición X: En este caso no hay movimiento porque la estación está precisamente en donde $C_1 = C_2$. No obstante, si por alguna desviación de la aeronave resulta que la flecha apuntara brevemente un poco “por debajo” de “X”, entonces $C_1 > C_2$ y el motor empezará a girar como las agujas del reloj, lo que posicionará la flecha otra vez en “X”. Si por el contrario la flecha apuntara brevemente “por encima” de “X”, entonces $C_2 > C_1$ y el motor giraría al revés del reloj, volviendo a colocar la flecha apuntando a “X”. En definitiva, esta posición es de equilibrio estable.

Emisor en posición C: Esta posición representa aparentemente un problema porque la estación está situada justamente al contrario de lo indicado por la flecha, pero como $C_1 = C_2$ en teoría la aguja permanecería en la posición errónea. Sin embargo, la más ligera desviación de esta posición provocaría que el conjunto diera una vuelta de 180° , colocando a la flecha en la posición correcta. Por ejemplo, si C se mueve relativamente un poco hacia abajo de la posición actual, $C_2 > C_1$ y la antena se movería al contrario del reloj, aumentando a cada momento la diferencia entre C_2 y C_1 , hasta que se dé una vuelta completa y se encuentre de nuevo el equilibrio, ahora con la flecha apuntando en el sentido correcto. Por tanto, la posición C.^{es} de .^{equilibrio inestable} no representa un problema en la práctica.

Conforme evolucionó la tecnología, se encontraron maneras de desarrollar un sistema ADF que resolviera la ambigüedad de sentido sin necesidad de rotar la antena de cuadro, mejorándose la confiabilidad del sistema.

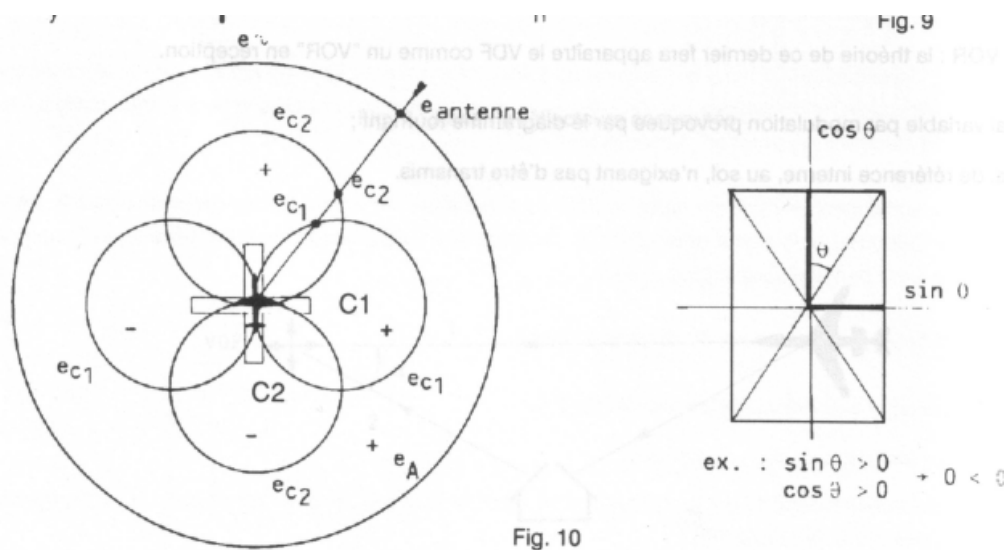
Para ello, se utilizan dos antenas de cuadro colocadas ortogonalmente. La que tiene su plano a lo largo del eje longitudinal del avión (adelante-atrás) es la “antena coseno”, mientras aquella cuyo plano coincide con el eje transversal es la antena seno”.

De esta manera se tienen dos diagramas de recepción en “ocho”, perpendiculares entre sí, que generarán sus respectivas cardioides al ser adecuadamente combinados con la señal proveniente de la antena de referencia. Observe el siguiente diagrama:

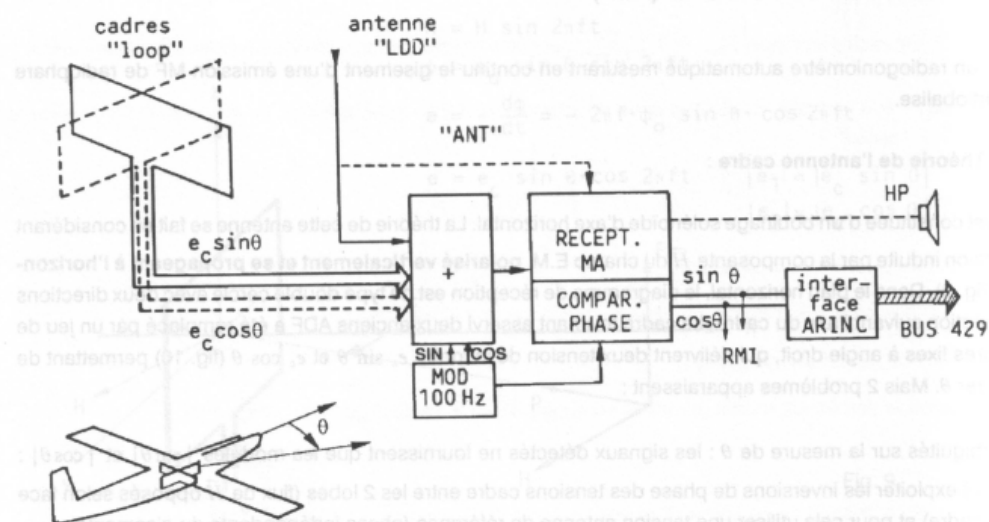
De forma análoga al caso del ADF con antena rotatoria, las señales provenientes de las antenas de cuadro son combinadas con la señal de la antena de referencia y alimentan alternativamente (con una frecuencia de alternancia de 100 Hz) a un comparador de fases. La salida de éste son los valores de seno y coseno del ángulo theta entre el eje longitudinal del avión y la posición de la estación.

Estas señales seno-coseno alimentan a los indicadores (por ejemplo, un Indicador Radio-Magnético o RMI), o a través de una interfaz ARINC 429 a un bus de datos digital.

A continuación se encuentra el diagrama de bloques típico de este sistema:



(a) Diagrama de las antenas de cuadro ortogonales



(b) Diagrama de bloques del ADF con antenas fijas

Figura 28: ADF fijo

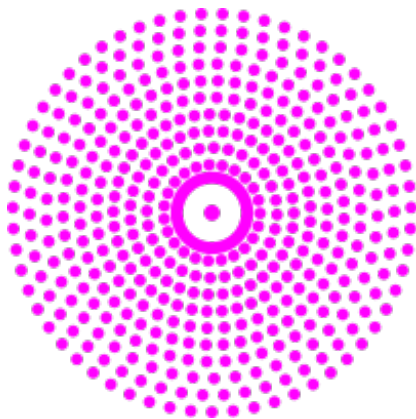
4.4.1. NDB

Como se indicó previamente, el NDB es la radioayuda en tierra que corresponde al ADF. Las subbandas de frecuencia usadas en Europa para los NDB típicamente se encuentran entre 255-415 y 510-525 kHz. Los NDB modulan en AM su identificación de estación en código Morse, compuesta usualmente por tres letras.

Estos radiofaros con emisión omnidireccional en azimut tienen la característica que sus antenas no pueden radiar en su dirección longitudinal, por lo cual justo por encima de los NDBs se forma un cono en el cual NO existe señal.

Este cono, característico también de otras radioayudas, es llamado "cono de silencio", y su ángulo de apertura puede tener, en el caso de los NDB, hasta 45° .

El alcance de los NDB puede ir desde unas 25 NM hasta más de 100 NM, dependiendo de la potencia



(a) Símbolo NDB usado en cartas aeronáuticas



(b) Emisor NDB en 49° 12.35' N, 2° 13.20' W. Call-sign JW - 'Jersey West'. 329.0 kHz

Figura 29: NDB

de emisión. Más allá de las 100 NM empiezan a aparecer importantes errores.

4.4.2. Errores ADF-NDB

El sistema ADF/NDB tiene errores que típicamente oscilan entre los 3 y 5 grados. Hay dos tipos principales de error que son:

Errores Sistemáticos Los errores sistemáticos se pueden caracterizar previamente y tomar previsiones ante ellos. Los más importantes son:

Error Instrumental Es el error asociado a incertidumbres en la lectura de los valores mostrados por los instrumentos. Oscila de 1 a 2 grados.

Error por presencia del avión La aeronave es un cuerpo metálico que puede interferir con la recepción del sistema, distorsionando las señales. Sin embargo, este error puede caracterizarse de fábrica y entonces tomar medidas correctivas.

Errores Variables Como su nombre lo indica, son errores cuya aparición y magnitud depende de múltiples factores, siendo esencialmente desconocidos. Los más conocidos son:

Errores atmosféricos (tormentas) El núcleo de las grandes tormentas genera poderosas cargas electromagnéticas cuya frecuencia puede estar en la banda de trabajo del ADF.

Esto ocasiona que las tormentas puedan aparecer como estaciones en tierra y el ADF apuntará hacia ellas. Es muy peligroso que el piloto las confunda con estaciones reales y vuele hacia ellas.

Errores de polarización Ciertas condiciones pueden alterar la polarización y propagación de las señales y ocasionar errores. Las más conocidas son:

Efecto de línea de costa , causado por la diferente conductividad entre la corteza terrestre y el agua, ocasionando que la señal se refracte al pasar por la costa y genere indicaciones erradas.

Efecto montaña , en donde debido a la orografía las ondas de tierra se pueden distorsionar, apareciendo errores de medición.

Interferencia xDSL (en estudio) La transmisión de datos por Internet utilizando la tecnología xDSL (HDSL, SDSL, VDSL y ADSL) puede generar señales que interfieran con la operación del ADF y con las comunicaciones HF.

Debido a la naturaleza de los sistemas xDSL la fuente de interferencia está distribuida geográficamente. Se están realizando estudios para determinar si el efecto acumulativo de muchas de estas señales puede alterar seriamente el funcionamiento del sistema (referencia actualizada al 21/Sep/2000).

Efecto FADING Este efecto de “desvanecimiento” aparece porque a cierta distancia de la estación emisora las “ondas de suelo” y las “ondas de cielo” (estas últimas por rebote ionosférico) empiezan a interferir entre sí.

La interferencia entre ambas señales puede ser constructiva o destructiva según el desfase que exista entre ellas, produciéndose el efecto de una recepción errática e intermitente.

El siguiente gráfico representa la intensidad de campo versus la distancia a la estación, indicando las zonas en donde es más probable que ocurra este efecto:

Una observación final es que durante la noche y cuando la aeronave se aproxima al “terminator” (línea divisoria entre el día y la noche) es más probable que se produzca este efecto, debido a la variación en la altura de la ionosfera.

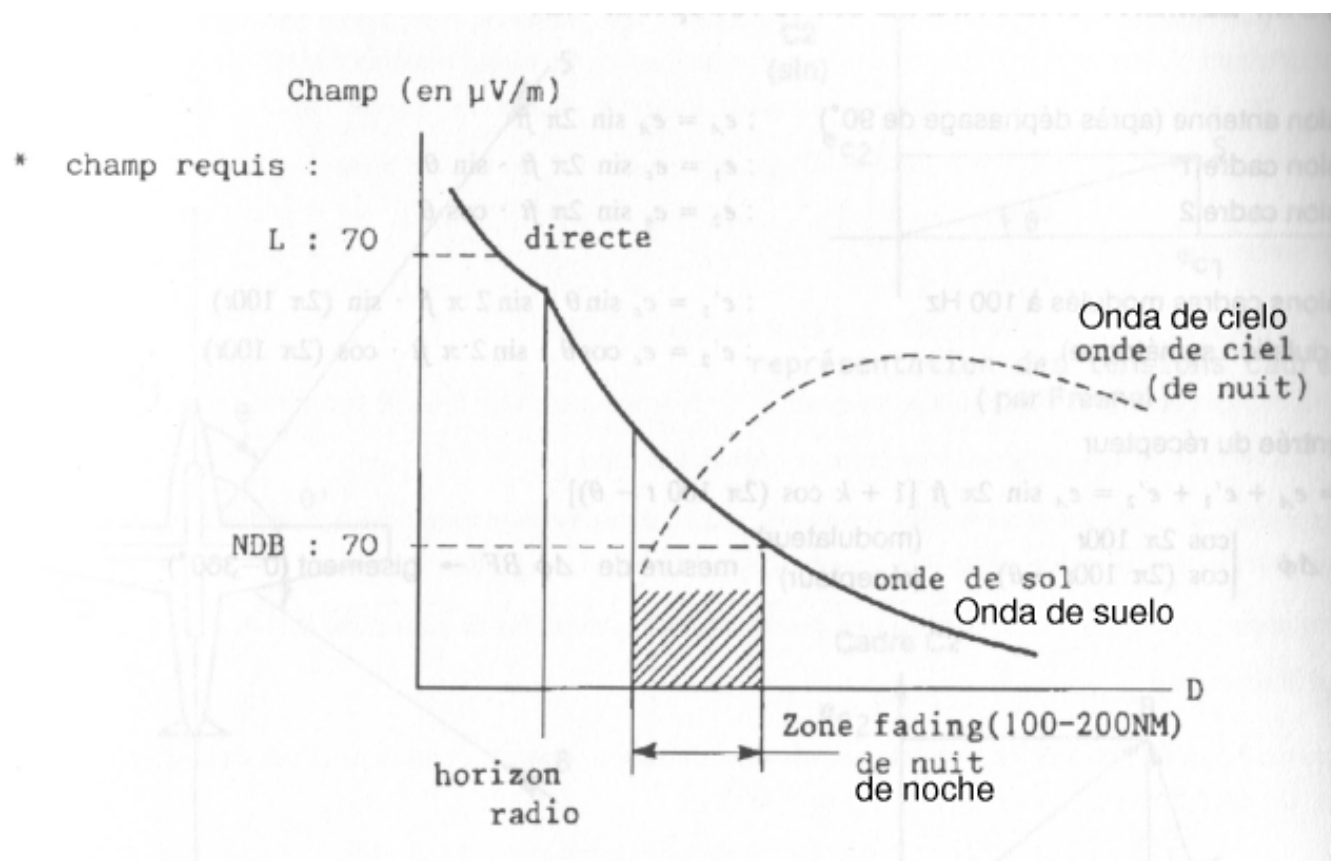


Figura 30: Gráfico del efecto "fading"

Referencias

- [1] Loran-history.info website. [http://http://www.loran-history.info/](http://www.loran-history.info/).
- [2] Salazar Hernández Dagoberto José. *Automatic Direction Finder - ADF (ESQUEMA)*. <http://nacc.upc.es/adf/index.html>.
- [3] Wikipedia. Wikipedia. la enciclopedia libre (español). <http://es.wikipedia.org>.

