

CONJUNTOS DE ANTENAS (ARRAYS)

INTRODUCCIÓN

Las exigencias de los radioastrónomos de la actualidad en la mejora de la resolución angular de las imágenes de radio llevó a explotar una técnica inventada en la época de la guerra por Martin Ryle: la interferometría.

El primer empleo de esta técnica arrojó datos precisos en la ubicación y tamaño de algunas radiofuentes que pudieron medirse ya en esos tiempos. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos en ese sentido, hubo algunas que no pudieron resolverse y se decidió llamarlas "radioestrellas". La existencia de estas estrellas especiales estuvo pendiente de confirmación, hasta que Cyril Hazard, usando la antena de 64 metros de Parkes, Australia, pudo localizar con exactitud, por una occultación de la misma por la Luna, la radiofuent 3C273 (del catálogo de Cambridge). Pasados los datos a Marteen Schmidt, de Monte Palomar, se descubrió que era un nuevo tipo de objeto: se había descubierto un **quasar**.

Que persigue la interferometría?

Para contestar esta pregunta, mudemos, por un momento, de longitud de onda y entremos en la región de las ondas visibles (luz). Más propiamente, veamos qué sucede en un telescopio óptico.

El objetivo de un telescopio tiene la tarea de formar imágenes en su plano focal. Por cada "punto de un objeto" deberá formar un "punto imagen". Sin embargo, el punto imagen no es tal en la práctica. La naturaleza ondulatoria de la luz causa que cada punto luminoso del objeto genere una mancha. Se la llama "mancha de difracción". El diámetro de esta mancha se calcula con

$$M = 2.44 \frac{\lambda * f}{D}$$

donde M: Diámetro de la mancha de difracción

λ: Longitud de onda de la luz empleada

f: Distancia focal del objetivo del telescopio

D: Diámetro (apertura) del objetivo (lente o espejo)

Las unidades empleadas deben ser las mismas para las cuatro variables.

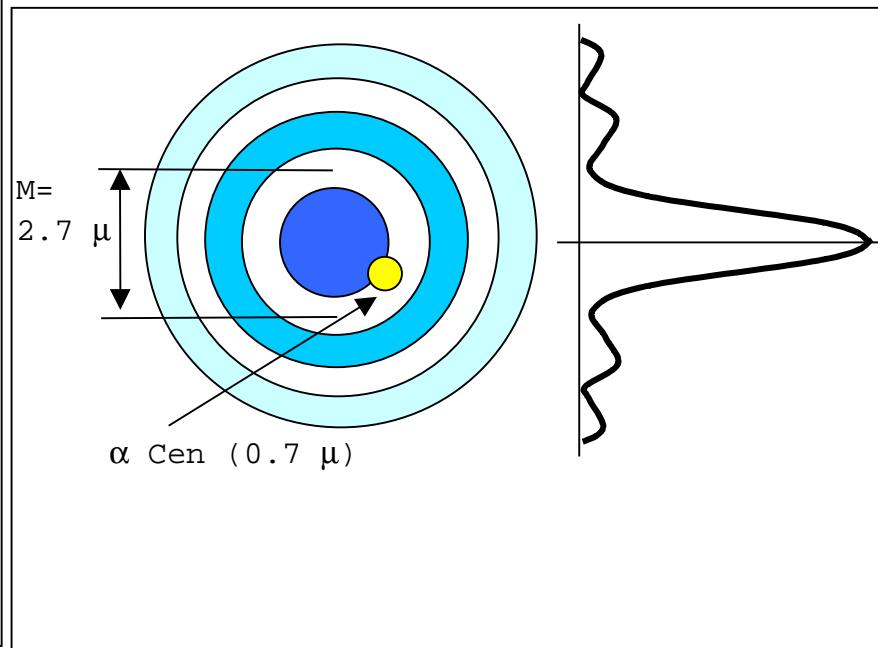
Un caso práctico, con dimensiones: El telescopio Keck, cuyo objetivo es de D=10 metros de diámetro (el mayor del mundo) y una distancia focal de f=20 metros produce una imagen de difracción

$$M \text{ (mm)} = 2.44 \frac{0.56 * 10^{-3} * 20000}{10000} = 0.00273 \text{ mm}$$

$$M = 2.73 \mu \text{ (micrones)}$$

Si quisiéramos ver el disco de la estrella más cercana, α Centauro, no lo podríamos hacer, pues su imagen tendría, en el plano focal, 0.7 μ de diámetro. La construcción de un telescopio de mayor diámetro, a fin de obtener una imagen de difracción de menor tamaño, es irrealizable por su costo.

*Fig. 5-1
Aspecto de la imagen de difracción con sus anillos, y tamaño de la imagen de la estrella más cercana, para su comparación. A la derecha, la curva de distribución luminosa en la mancha.*

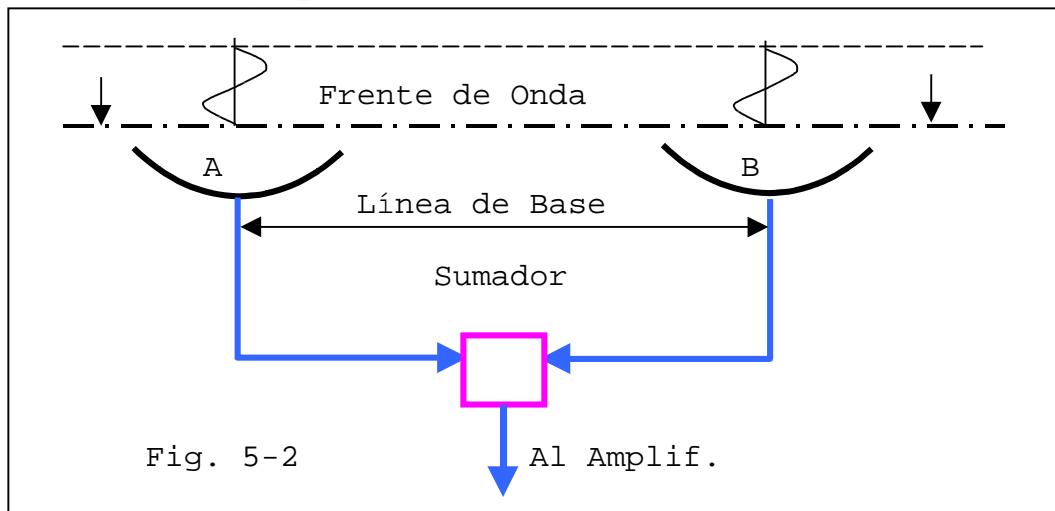


Sin embargo, existe la posibilidad de obtener una resolución angular aún mayor a la del telescopio de 10 metros, combinando una cantidad de pequeños espejos distribuidos en una forma determinada, concentrando todos su luz en un foco común.

Cada par de espejos dará lugar en el foco, a una serie de franjas luminosas. La combinación de las franjas de cada par de espejos resultará en una imagen. Si la distribución de los espejos es conveniente, este conjunto (array) de objetivos dará una mancha de difracción de menor tamaño que la del espejo único. Lo veremos más adelante.

INTERFERÓMETRO DE DOS ANTENAS

Veremos primero la celda fundamental de los conjuntos de antenas (arrays) que es el interferómetro de dos antenas para pasar a analizar, más tarde, los conjuntos de varias de ellas trabajando en grupo.



Dos antenas de similares características (dentro de lo posible) juntan sus señales de salida en un sumador, que así se dirige al amplificador.

Las antenas están a una distancia fija, la línea de base, y en un primer análisis, las suponemos apuntadas al zenit.

Una radiofuentepuntual pasa por delante de ellas, haciendo llegar a sus superficies colectoras, un frente de onda plano, ya que se supone a suficiente distancia como para que así sea.

Por estar la radiofuentepuntual en el zenit, el frente de onda proveniente de ella llega a ambas antenas al mismo tiempo.

Los tramos de cable antena-sumador son iguales para las dos antenas, por lo que en ese momento las señales llegan al sumador en fase. Como el sumador adiciona las señales instantáneas, la salida será la suma directa de las dos ondas.

A medida que la fuente se desplace hacia el oeste el frente de onda se inclinará haciendo que al sumador lleguen las dos ondas algo defasadas entre sí, con lo que al sumarse fuera de fase, la resultante irá disminuyendo a medida que aumente el retardo (ver figura).

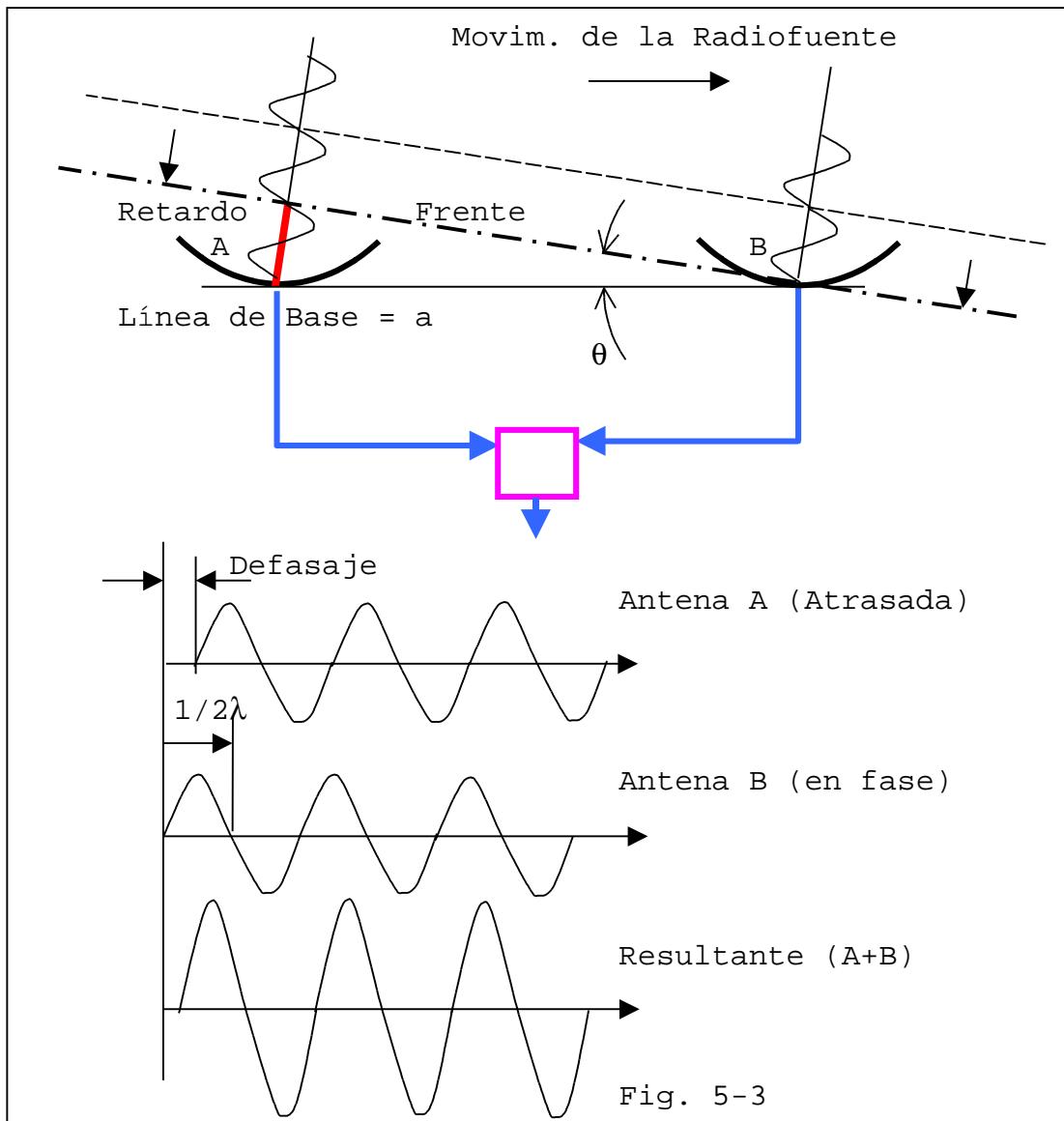


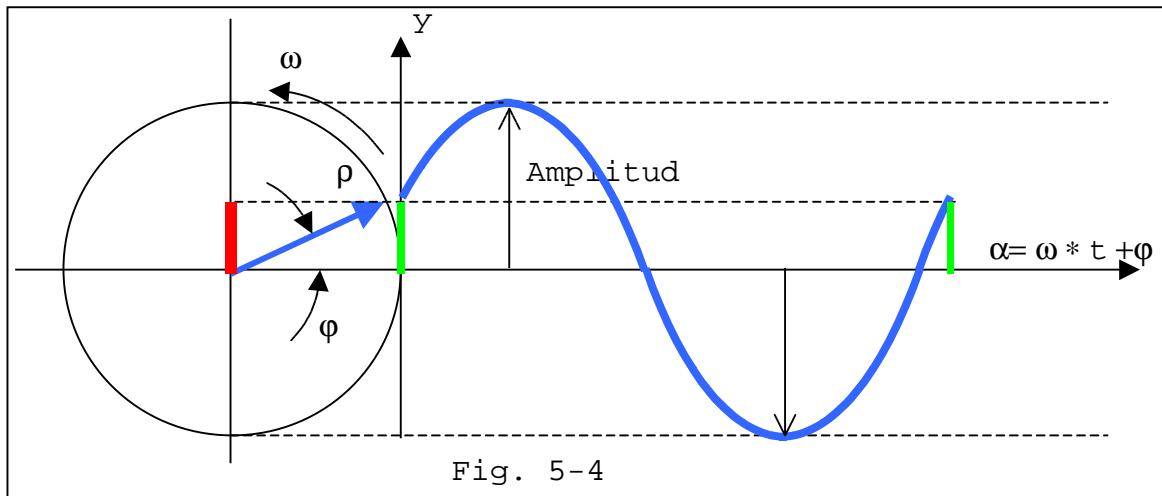
Fig. 5-3

Así siguiendo, llegará un momento donde el defasaje alcanzará $1/2 \lambda$ haciendo llegar las ondas en contrafase al sumador, cuya salida, a consecuencia, será cero. Aquí el ángulo que forma el frente de onda con la línea de base, θ , define un cero del interferómetro (su salida resultante es cero) y marca una posición fija en el cielo, desde donde cualquier radiofuente puntual que pase por allí dará una señal cero en el interferómetro.

Al seguir moviéndose la fuente hacia el oeste, continúa variando el defasaje haciendo que el aparato vuelva a tener respuesta. Esto sigue hasta que nuevamente las señales que llegan al sumador están perfectamente en fase.

El registro mostrará otro máximo. Otra vez, este máximo es una posición fija en el cielo, y su lugar solo está dado por la orientación de la línea entre las antenas y su separación en longitudes de onda.

Existe una forma interesante de ver este problema. Consiste en la interpretación vectorial. Toda senoide (o cosenoide) se puede representar como la proyección vertical de un vector rotatorio.



El vector, de largo ρ , gira con una velocidad angular ω (radianes por segundo). En el instante $t=0$ segundos, el vector está inclinado en un ángulo ϕ , que se llama **fase inicial** del vector. En cada instante t , el ángulo que forma el vector con la horizontal es $\alpha = \omega * t + \phi$. A la derecha se representa la proyección vertical de ese vector para cada ángulo α , para toda una vuelta del vector, lo que resulta en una senoide.

La expresión matemática de la senoide es

$$y = \rho * \sin(\omega * t + \phi)$$

La amplitud de la senoide es justamente el largo (la magnitud) del vector ρ .

Volviendo al caso de las dos antenas, podríamos estudiar como son los vectores que originarian las senoides vistas arriba.

Habrá dos senoides iguales. Una por cada antena. Tomamos como **referencia** a la antena B. Para esta antena consideraremos que el vector está horizontal, o sea $\phi_B = 0^\circ$.

La onda de la antena A, a medida que la radiofuentे se va alejando de la normal a la Línea de Base, inclinando su frente de onda en un ángulo θ creciente, se va atrasando respecto a la B. Esto se manifiesta como un desplazamiento angular del vector ρ_B respecto del ρ_A .

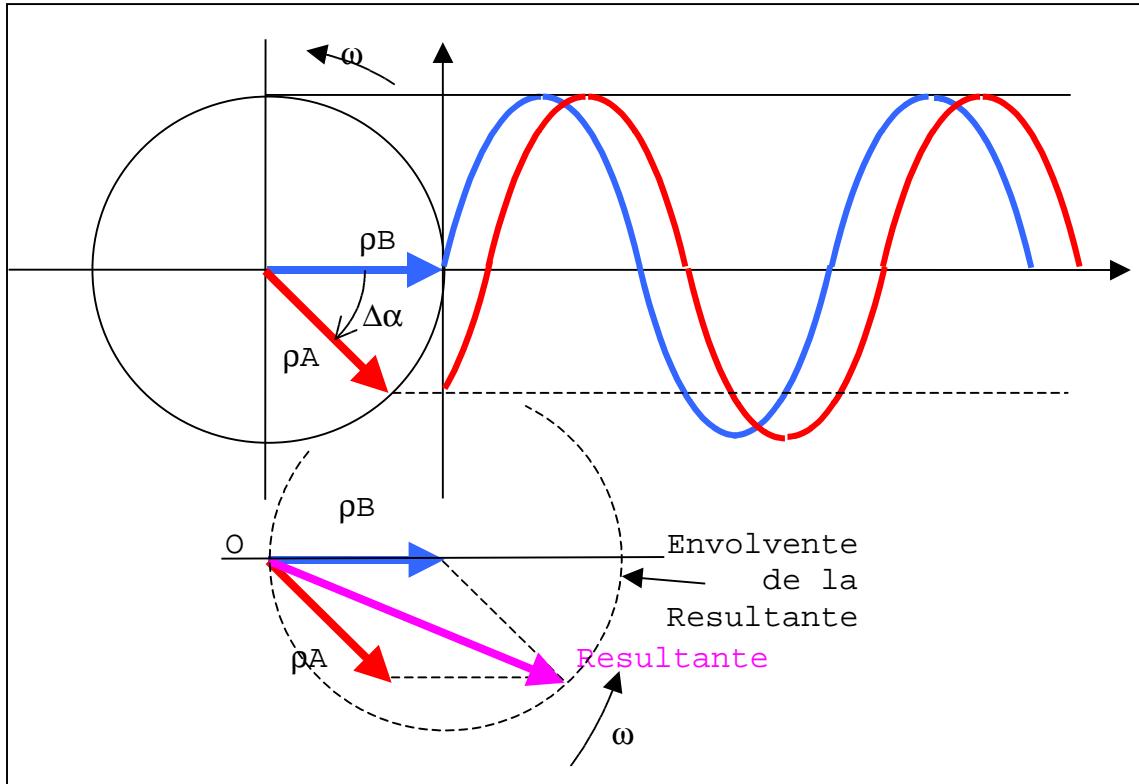


Fig. 5-5 Vemos el ángulo que va tomando el vector de la antena B respecto a la de la A. En el sumador, ambos vectores se adicionan geométricamente, como vemos abajo. A medida que el vector B se atrasa más y más respecto del A, el extremo del Resultante va describiendo una circunferencia envolvente. Podemos ver, luego, que cuando el vector de B es opuesto al del A, el Resultante se anula, por lo que del sumador no sale señal alguna.

La potencia de señal que saldrá del sumador será causada por esa Resultante, suma vectorial de las dos ondas que provienen de las dos antenas. Vimos que esta Resultante es **máxima** para $\theta = 0$ y se hace cero para otros valores de θ , tales que el Retardo sea múltiplo impar de $1/2\lambda$. Para estos valores del retardo, los vectores de las antenas estarán separadas por un ángulo de 180° (contrafase).

Si observamos el gráfico de las dos antenas podemos ver que el retardo es

$$\text{Retardo} = a * \sin(\theta)$$

con a = Longitud de la Línea de Base

El ángulo $\Delta\alpha$ que representa este retardo en términos de λ es

$$\Delta\alpha = 2\pi \frac{\text{Retardo}}{\lambda} = 2\pi \frac{a * \sin(\theta)}{\lambda}$$

La relación a/λ es la longitud de la Línea de Base medida en longitudes de onda.

Para pequeños ángulos (menores de 6° aprox.) se puede aproximar

$$\sin(\theta) \sim \theta \text{ (radianes)}$$

de modo que la expresión se simplifica a

$$\Delta\alpha = 2\pi \frac{a}{\lambda} \theta$$

quedando el factor $2\pi \frac{a}{\lambda}$ como el valor por el cual hay que multiplicar a θ para obtener $\Delta\alpha$.

Como se mencionó antes, los vectores se restarán cuando estén en contrafase, es decir, cuando

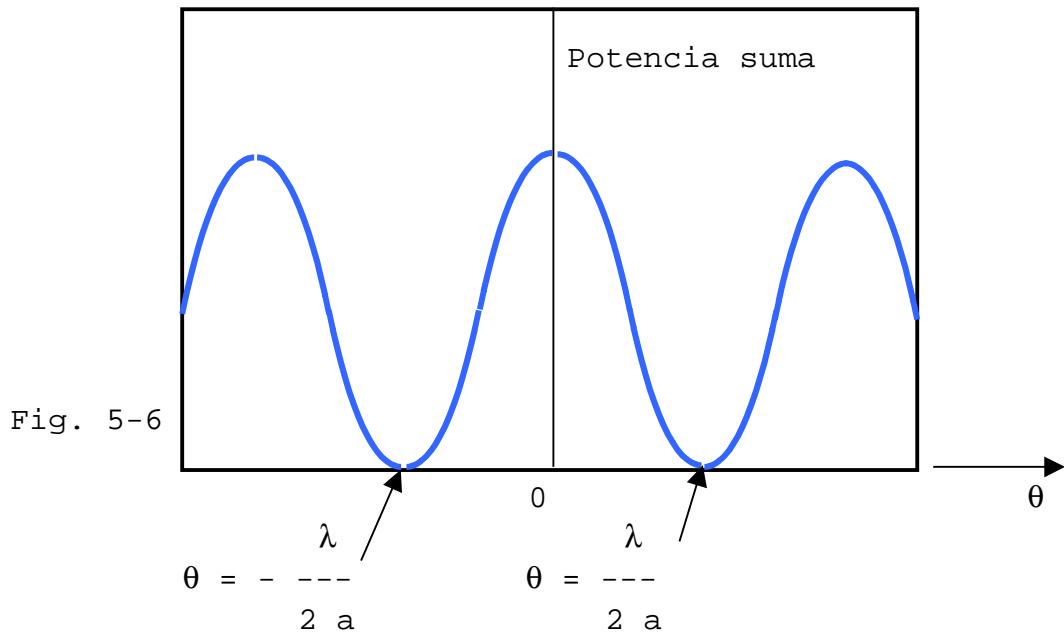
$$\Delta\alpha = 180^\circ = (2n+1)\pi.$$

con $n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$

Los valores de θ que pongan los vectores en contrafase serán

$$\theta(0) = (2n+1) \frac{\lambda}{2a}$$

Estos serán los ceros de la potencia de salida del sumador. Si representamos gráficamente esta potencia en función del ángulo θ del frente de onda con la Línea de Base tenemos:

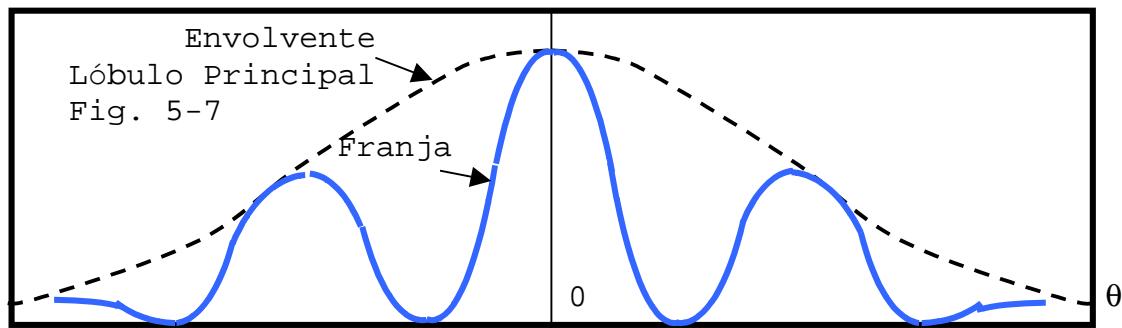


Como vemos existen máximos recurrentes cada vez que los vectores se encuentran en fase, debido a que el retardo es justo $= 1 \lambda$.

Todo esto se produce dentro del haz de las antenas.

Lógicamente, a medida que la fuente se aleje de la vertical y se acerque al borde del haz, el registro de esa fuente en el interferómetro disminuirá en intensidad, hasta que, salida del haz, se haga cero.

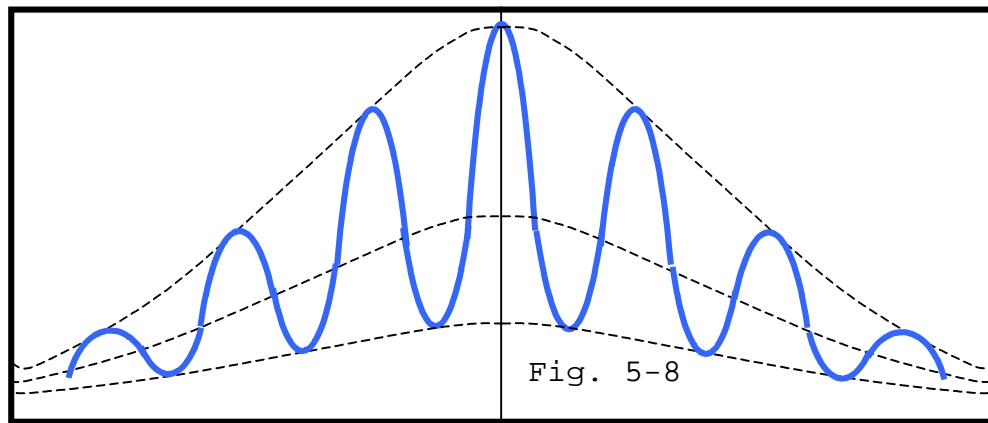
Como resultante tendremos una sinusoida que toca el eje horizontal, con una amplitud proporcional a la intensidad de la fuente.



A cada una de las ondas de la sinusoide se la suele llamar **franja de interferencia**.

Del análisis previo es fácil deducir que cuando la fuente tiene alguna extensión angular, el resultado cambia.

Una fuente que ocupa menos de un valle (o una cúspide) de la franja, cuando se encuentre en la posición de un cero, solo una porción de la fuente se anulará pues otras partes de la misma estarán todavía llegando al interferómetro. Como resultado, los "ceros" no serán del todo cero.



Este efecto se utiliza para determinar el tamaño aproximado de este tipo de radiofuentे.

Si, en cambio, la fuente se extiende por toda una franja (ocupando un valle y una cúspide), su registro será coincidente con la Envolvente, habiendo perdido las franjas, pues cuando una parte está oculta al interferómetro, la otra brilla, compensando la porción faltante.

Una forma intuitiva práctica para visualizar estos fenómenos descriptos sin tener que pensar en los frentes de onda y sus inclinaciones, etc. es asumiendo que en el cielo existen "barrotes" paralelos oscuros fijos que ocultan las radiofuentes que pasan por detrás de ellos. La ubicación de estos barrotes solo depende de la orientación y la longitud de la línea de base, así que apenas se ubican las antenas en su lugar de trabajo, los citados barrotes toman su lugar en el cielo.

Además, a ellos y al cielo los vemos a través de una "ventana" circular, que es el haz de la antena (de cada antena individual). Por supuesto, el interferómetro no "ve" a las

fuentes con su detalle sino que integra el brillo total que pasa por la ventana redonda bloqueada por los barrotes oscurecedores fijos en el cielo.

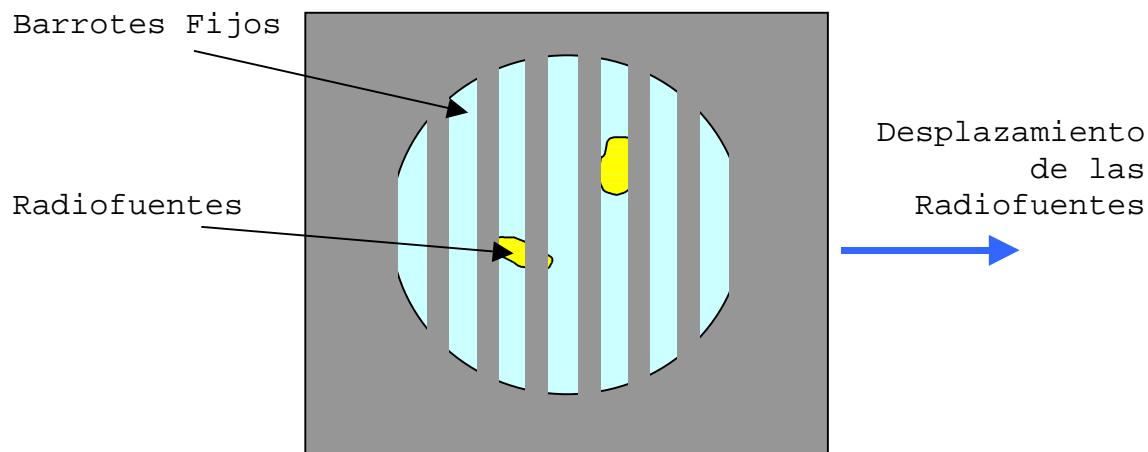
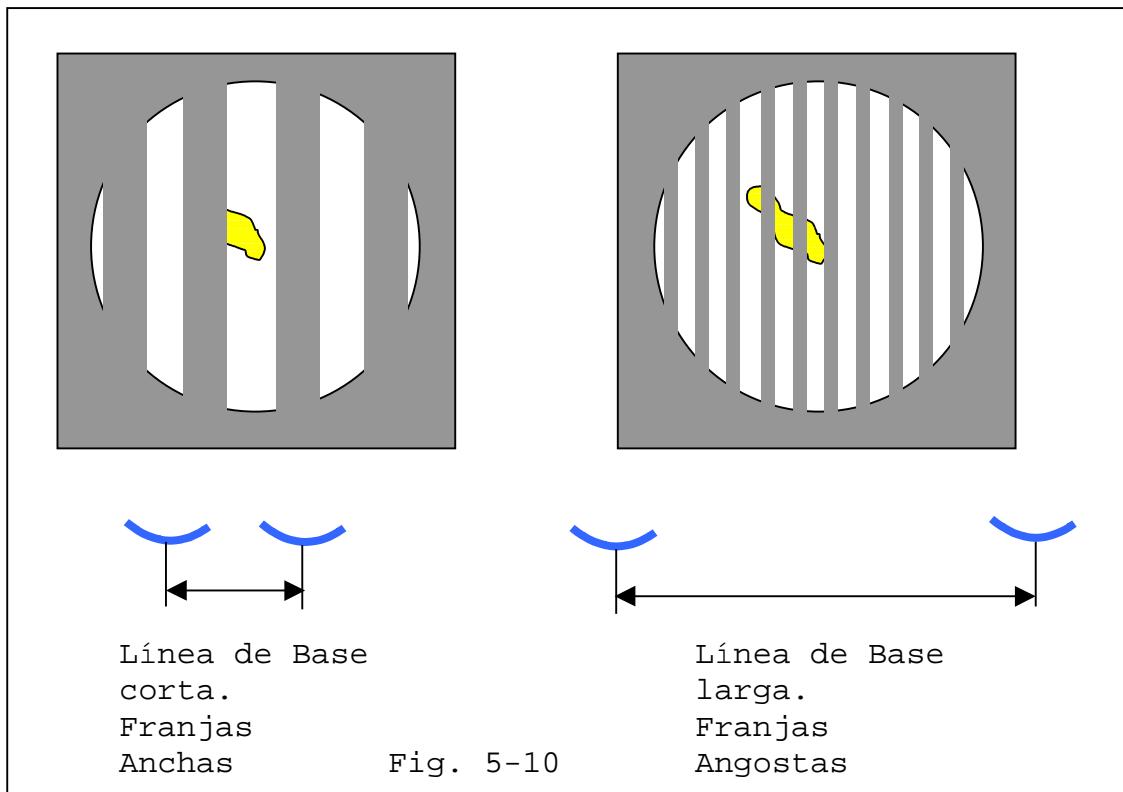


Fig. 5-9 El interferómetro integra toda la radiación que pasa por la ventana, entre los "barrotes". A medida que las radiofuentes se desplazan hacia la derecha por el movimiento diurno, en el registro que toma el receptor se van formando franjas de interferencia como se explica en el texto.

Si las antenas, en lugar de permanecer estacionarias, se dispusieran a "seguir" a una radiofuentе, como se suele hacer en los trabajos de **Síntesis de Apertura**, la ventana redonda se desplazaría por el cielo centrada en la fuente, pero los barrotes seguirían fijos en el cielo, de modo que la misma se seguiría ocultando y saliendo detrás de ellos dejando el registro sinusoidal descripto antes.

Si las antenas se separaran más, los barrotes se juntarían y afinaríaп, y viceversa si se acercaran. Se deduce así, que antenas más alejadas darán mayor número de franjas por hora en el registro (Habrá más franjas dentro de la ventana).

Se debe entender que el espaciado angular entre franjas proyectados en el cielo es mucho menor al ancho del haz de cada antena individual, pues vimos que dentro de éste caben varias franjas (barrotes), y que a medida que separamos más las antenas entre sí, mayor es el número de barrotes que entran en la ventana.



El fenómeno de la interferencia se utiliza para incrementar la resolución angular sin aumentar el tamaño propio de las antenas, pues a través del estudio de las franjas podemos reconstruir la forma de la fuente que las originó.

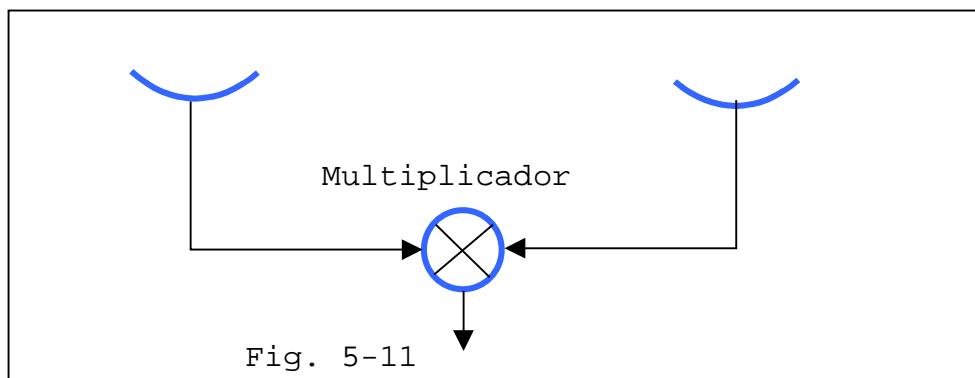
La base teórica matemática que permite este trabajo la aporta el análisis de Fourier, tema que vemos en otro capítulo.

Se estudia, entonces, la misma región del cielo usando diferentes separaciones y orientaciones entre antenas (Líneas de Base). Componiendo los registros resultantes se llega a tener la imagen de la fuente con una resolución dada por el distanciado angular de las franjas más apretadas que se haya usado en el análisis, correspondiente a la mayor separación entre antenas. Desde luego usando solo un interferómetro de dos antenas, esto lleva a cantidades de tiempo considerables.

Para acortar el tiempo necesario a fin de obtener los datos que formen una imagen, se emplea un grupo de varias antenas (array, en inglés). Cada par de antenas del grupo forma un interferómetro de dos antenas con diferente Línea de Base.

Veremos otros tipos de interferómetro de dos antenas antes de ir al conjunto.

INTERFERÓMETRO CON MULTIPLICADOR



La diferencia que existe con el anterior está en el reemplazo del sumador por un multiplicador (en la práctica, un modulador balanceado).

El registro del interferómetro analizado antes daba, en general, una "continua con alterna superpuesta". La continua correspondía a fuentes extendidas que ocupan un número entero de barrotes y no dan franjas, y consiste en una variación suave de la señal parecida a la registrada en el sistema de una sola antena de potencia total. En cambio, la alterna corresponde a fuentes de pequeño tamaño en relación con el la franja o a porciones de fuentes extendidas que no coinciden con un número entero de franjas.

Este tipo de interferómetro tiene el problema que consiste en que el nivel de base de las oscilaciones (franjas) varía en mucho mayor escala que la amplitud de las franjas mismas haciendo, con esto, muy difícil su seguimiento, que es lo que en definitiva va a dar la mejora en la resolución angular.

Esto significa que el registro se va de rango fácilmente a causa de la variación suave. Esto no permite estudiar las franjas correctamente. El análisis de Fourier necesita fundamentalmente los datos de las franjas y no de la variación suave.

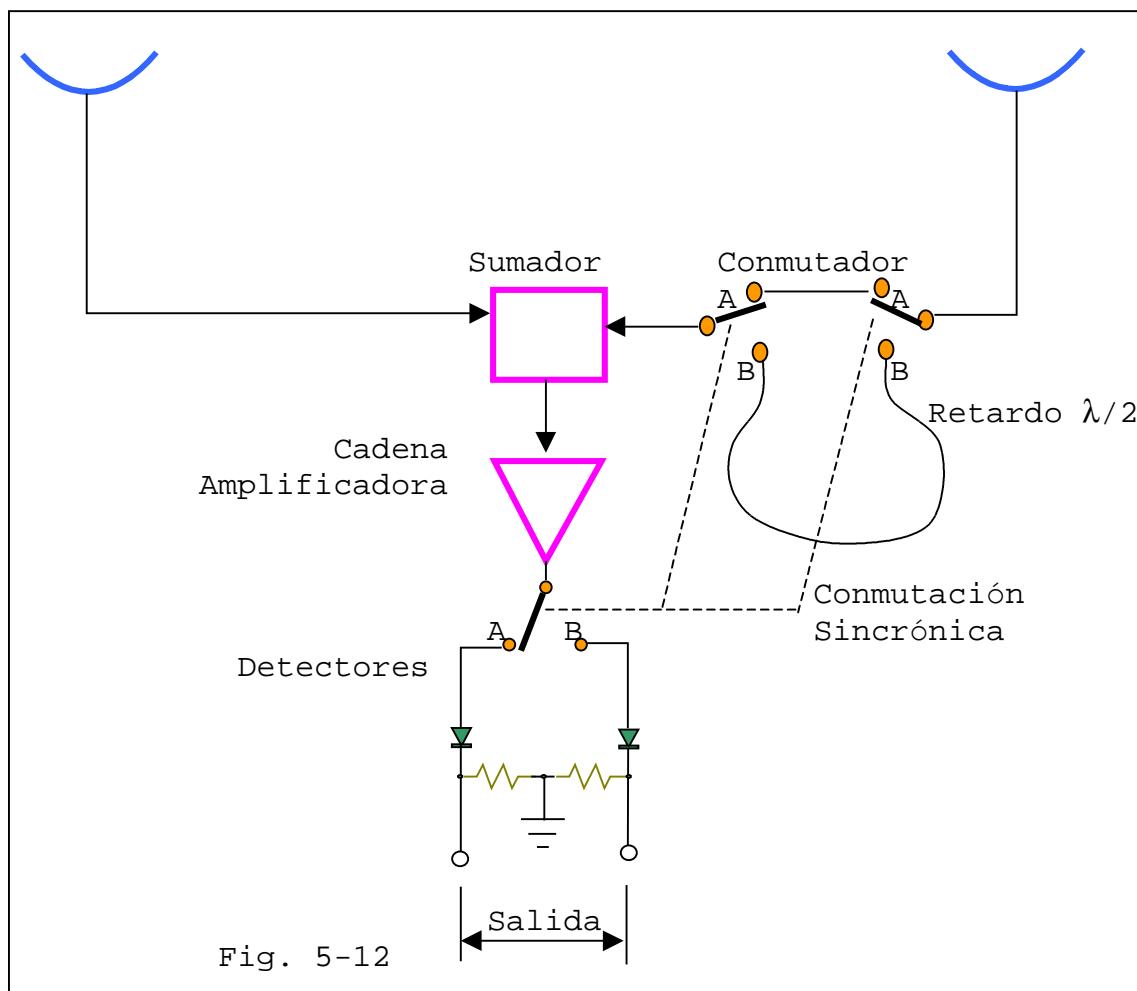
El multiplicador en lugar del sumador, produce el efecto de filtrar la continua (variación suave) dejando de manifiesto solo las componentes variables, es decir, las franjas, que quedan centradas sobre una línea de base recta horizontal.

Este tipo de configuración de interferómetro solo "ve" los bordes de las radiofuentes extendidas o las fuentes pequeñas en relación al tamaño de las franjas.

Al igual que en el caso anterior, se necesita estudiar una región del cielo con varias separaciones entre antenas, a fin de tener variados distanciados entre franjas para recomponer la imagen en alta resolución.

INTERFERÓMETRO CON CONMUTACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE FASE

Llamado Phase Switching Interferometer en la literatura inglesa, su resultado es similar a la del estudiado anteriormente (multiplicador). Se lo puede interpretar como la conmutación entre dos interferómetros con sumador. Uno con cables antena-sumador iguales y otro con una diferencia en longitud igual a $1/2 \lambda$, a fin de que se sumen en contrafase.

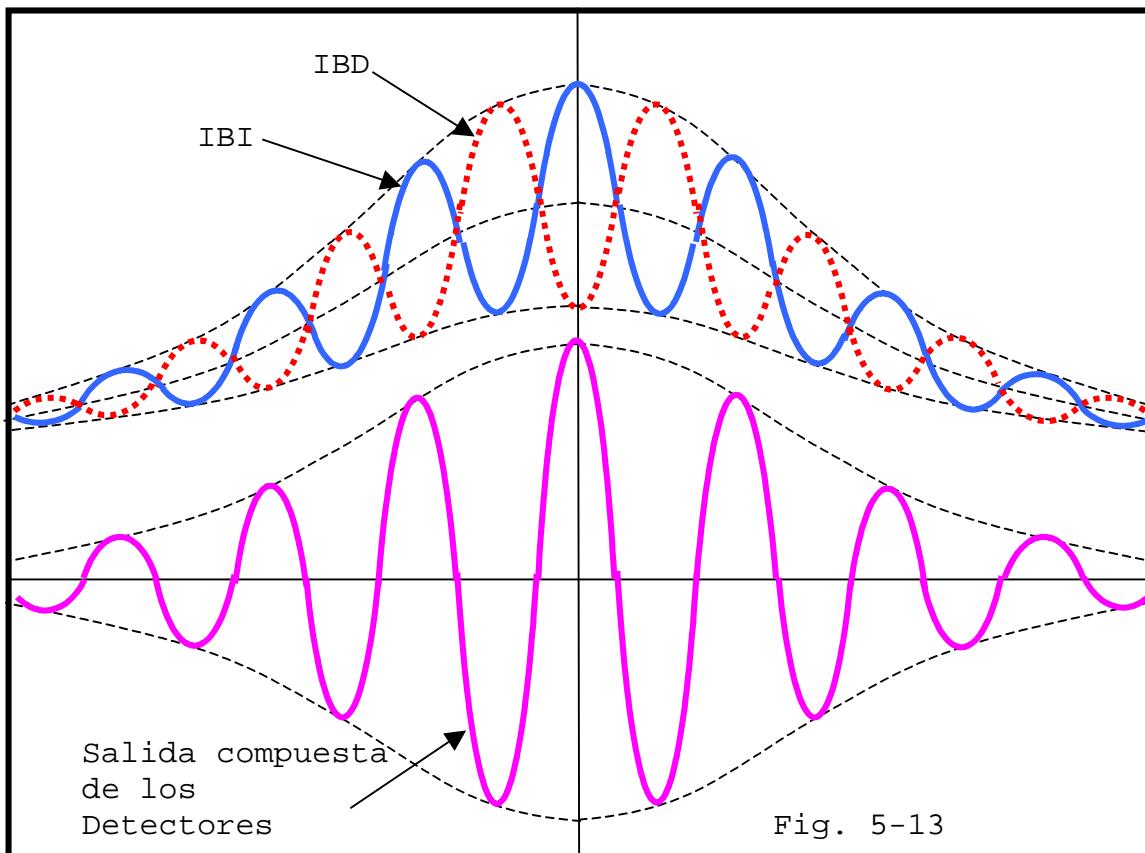


Supongamos que ponemos los 3 conmutadores en A. Tendremos un interferómetro de dos antenas con sumador, con tramos de cable idénticos de antena-sumador, como el explicado antes. Lo llamamos interferómetro de brazos iguales (IBI).

Si luego pasamos los 3 conmutadores a B, aparecerá un largo adicional en el cable de la antena derecha, de $\lambda/2$. Este interferómetro será de brazos diferentes (IBD). Esto hará el efecto que cuando en el registro del IBI aparece un pico máximo, en el IBD la señal se anulará (habrá un cero en la señal).

Podemos ver, en linea llena, un registro del interferómetro IBI y en punteado el IBD.

La conmutación rápida (400 veces por segundo aprox.) y sincrónica de los 3 conmutadores da como resultado, en la salida, la resta entre ambos registros.



Como se puede notar, no hay variación suave (continua) en la salida del aparato. Solo las franjas quedan en evidencia.

Estos interferómetros tienen la ventaja adicional respecto del de potencia total (y del interferómetro sumador) de una mejora en el rechazo a la interferencia producida por señales terrestres, como TV u otro tipo que no de una señal efectiva de fase, que es, en definitiva, lo que mide este dispositivo.

Indirectamente esta cualidad incrementa muchísimo la sensibilidad del conjunto y es el aparato más recomendable para el aficionado. En Australia varios amateur han adoptado este diseño con ligeras variantes llegando a captar radiofuentes verdaderamente débiles (~1Jansky!) que quedan fuera del alcance de los de potencia total, que en una ciudad se ven inundados por todo tipo de señales indeseadas.

Es importante destacar que al considerar la visualización intuitiva se tenga en cuenta que ahora no hay "barrotes" que tapen la radiofuentre que pasa por "detrás", sino que media franja será de signo positivo y la otra media, negativo. Eso es lo que aparecerá en el registro tomado por el equipo receptor.

En el gráfico que sigue se puede reconocer la existencia de estas franjas de distinto signo "a través" de las que se nota una radiofuentre.

Como se explicó antes, la señal que resultará en la salida del radiotelescopio, en cada momento dado es el resultado de integrar toda esta imagen, sumando cada elemento de la misma teniendo en cuenta el signo correspondiente. Se puede deducir entonces que una fuente puntual dará una señal senoidal que aumenta y luego disminuye, a medida que la fuente pasa por delante del haz de la antena (como lo que muestra la figura anterior).

La orientación en el cielo de las franjas es perpendicular a la línea que une ambas antenas (Línea de Base). De modo que una vez fijada la Línea de Base y la longitud de onda de trabajo λ , quedan definidas las franjas y su orientación.

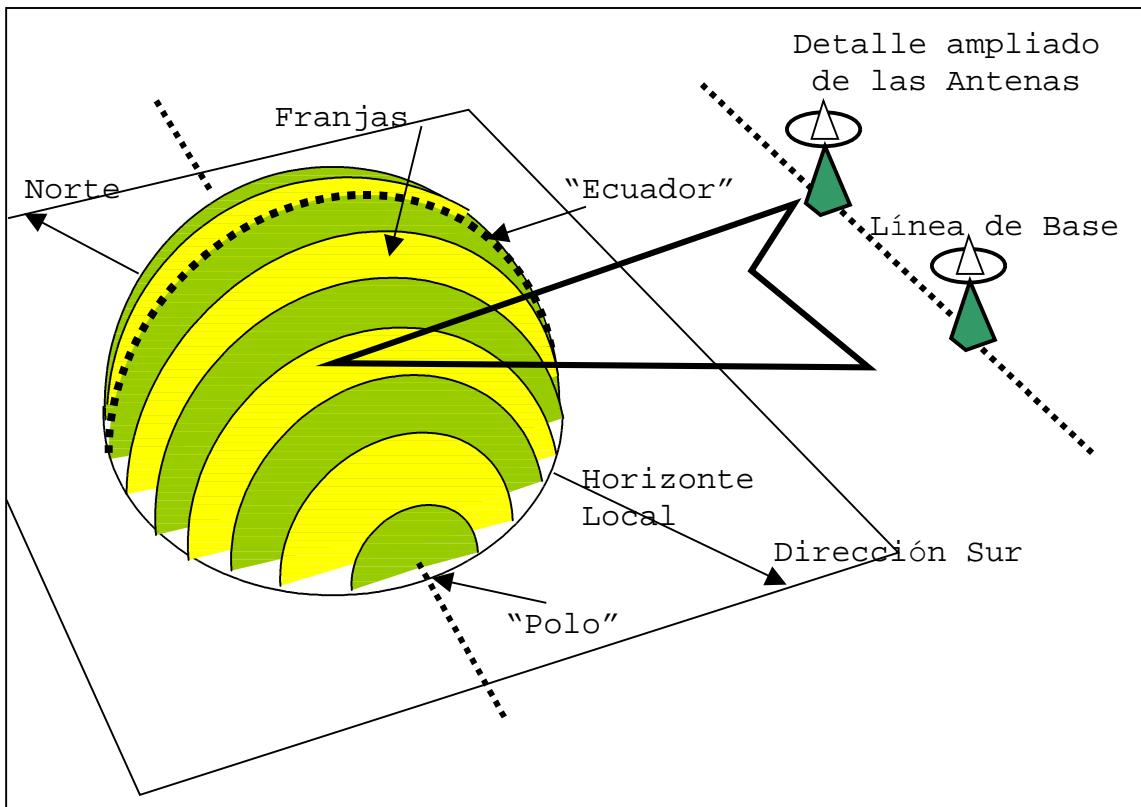


Fig. 5-14 Vemos la proyección sobre la esfera celeste de planos perpendiculares a la Línea de Base, que definen las franjas y su orientación, comparada con una hipotética dirección Norte-Sur. A la derecha se ve un detalle de la disposición de las antenas que generan estas franjas.

INTERFERÓMETRO DE LÓBULO BARREDOR

Este tipo de instrumento tiene la interesante característica de hacer desplazar las franjas en el cielo en forma controlada. Con esto se logra tener un registro donde aparecen las franjas de interferencia rápidamente, no teniendo que esperar el desplazamiento de la radiofuent "por detrás" de las mismas, como en los otros interferómetros.

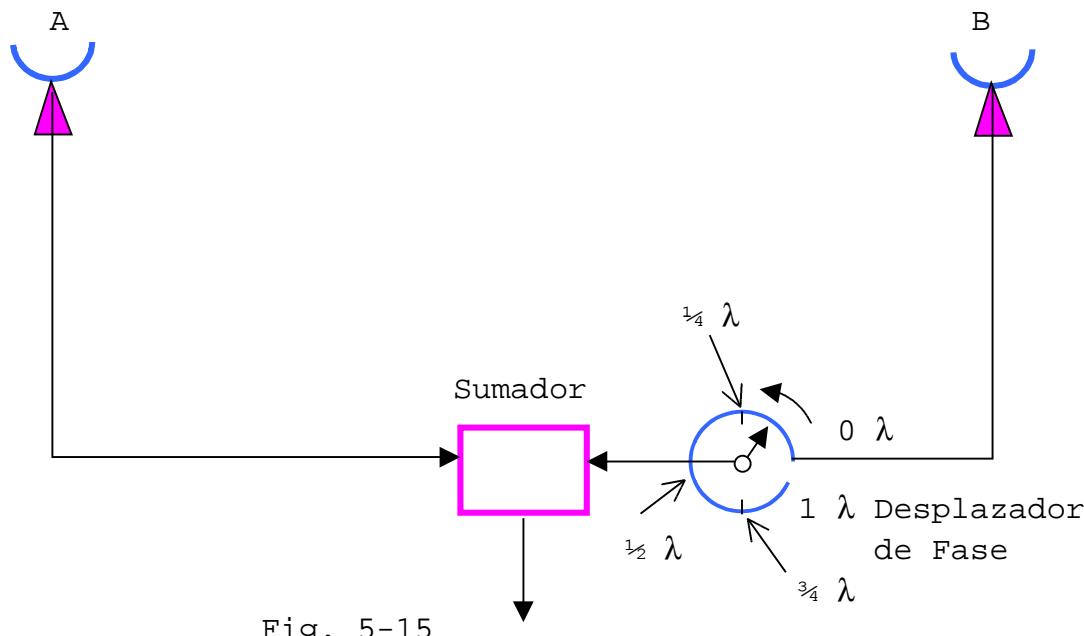
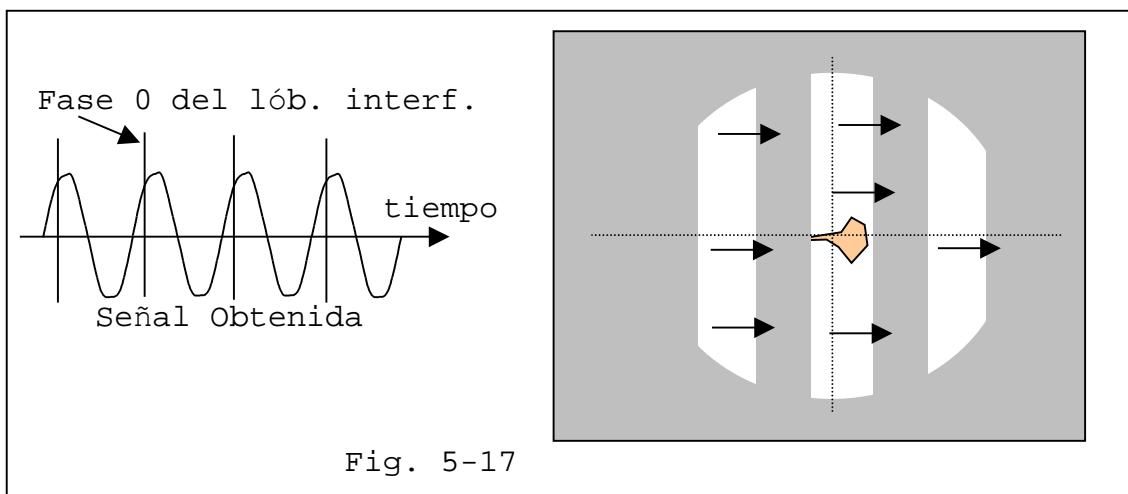
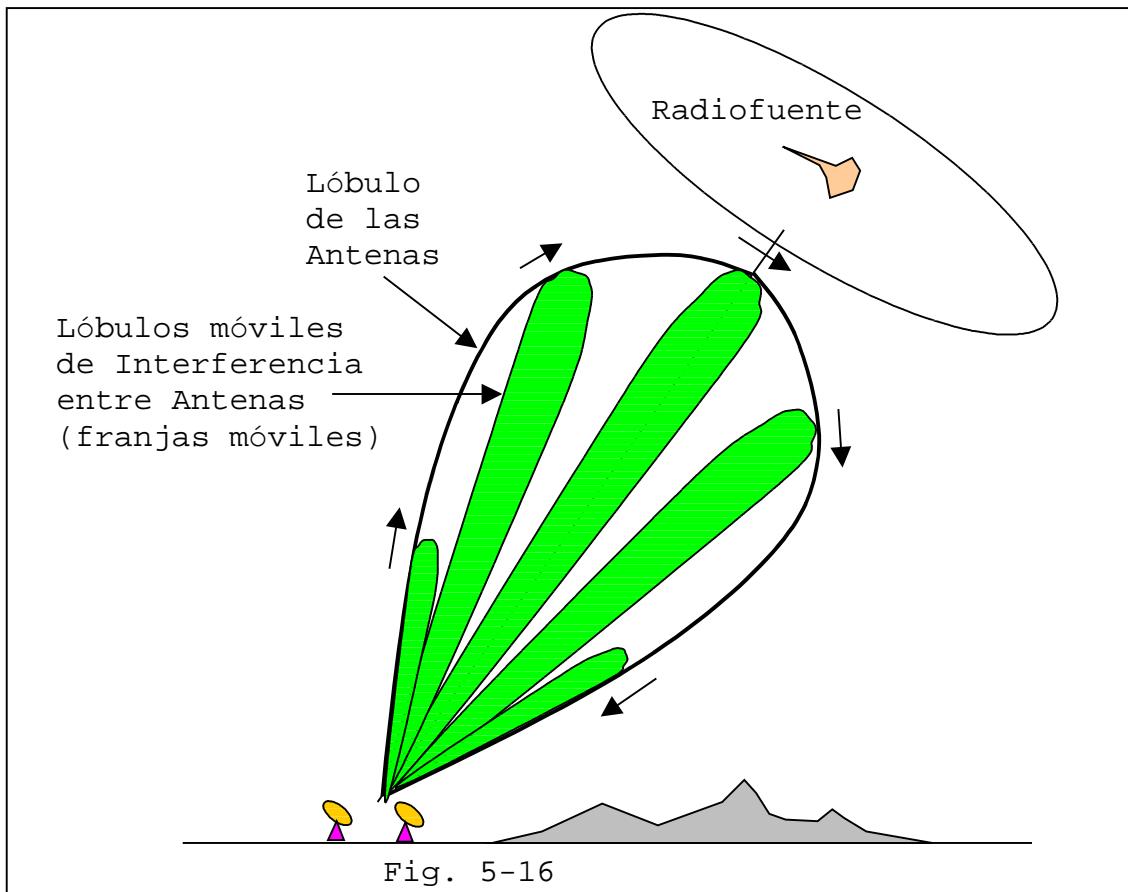


Fig. 5-15

En este aparato también se produce un desplazamiento de fase de la señal proveniente de una antena respecto de la otra, en forma similar al de fase comutada anteriormente visto en la Fig. 5-12, pero con la diferencia que en lugar de desplazar la fase en $\frac{1}{2}\lambda$ solamente, aquí se realiza un progreso continuo en el ángulo de fase desplazado, desde 0λ hasta 1λ , lo que significa un rango de 0 a 2π radianes.

El efecto logrado es el "barrido" del campo de cielo abarcado por las antenas, por las franjas a razón de una franja por vuelta del Desplazador de Fase. La señal que sale del Sumador, luego de pasar por el detector, consiste en una sinusoida continua, en el caso de que en el campo haya una fuente puntual o no resoluble por las franjas.



En la Fig. 5-16 vemos como se mueven los lóbulos interferométricos dentro del principal. En la Fig. 5-17 vemos las franjas móviles y la señal obtenida en el receptor. Las marcas verticales señalan los instantes donde un lóbulo interf. pasa por el centro exacto del campo (fase del lóbulo = 0°).

DETERMINACIÓN DE LAS FRANJAS DE REFERENCIA PARA LA SÍNTESIS DE APERTURA CON AYUDA DEL MOVIMIENTO DE ROTACIÓN TERRESTRE

Vamos a ver ahora como obtener imágenes usando el método llamado de síntesis de apertura, aprovechando el movimiento de rotación terrestre. En este caso, las antenas deberán seguir a la radiofuente a lo largo de su movimiento diurno, a diferencia con lo visto antes donde las antenas fijas esperaban el paso de las mismas.

Ya se ha mencionado que un solo par de antenas a modo de interferómetro de cualquier tipo nos genera un registro que consiste, para una fuente puntual, de una sinusoide que crece y disminuye de amplitud, a medida que la fuente pasa por el haz de ambas antenas.

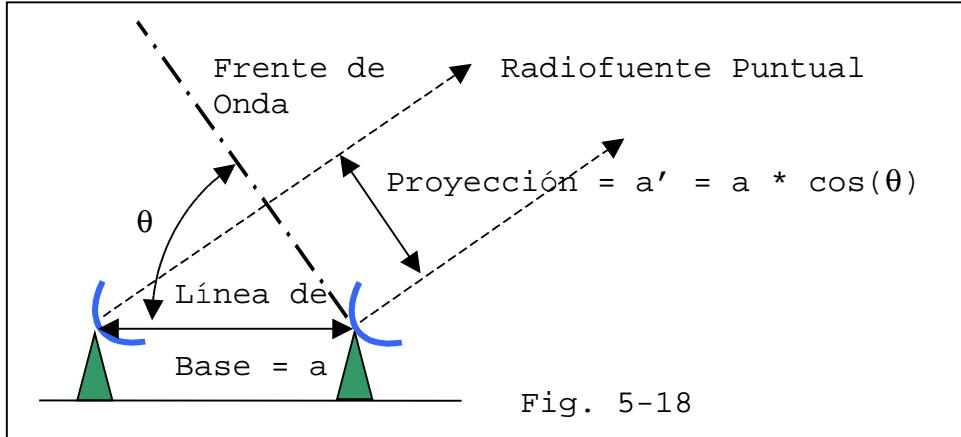
Si la fuente es extendida, se presentan ondas en sus bordes, o donde tiene variaciones bruscas de intensidad, dejando en la incógnita el resto.

Para recomponer una imagen, será necesario ayudarnos con la teoría, fundamentalmente con el análisis de Fourier, que determina que se estudie la fuente con diferentes separaciones entre antenas y diferentes orientaciones de las mismas.

El trabajo de síntesis puede realizarse con solo dos antenas, disponiéndolas, a cada tránsito de la radiofuente, en diferentes lugares, a fin de obtener, cada vez, una distinta Línea de Base y orientación de la misma. Tomar los registros de este modo puede llevar enormes cantidades de tiempo. Un método mejor, consiste en la colocación de varias antenas, las que en un solo tránsito de la fuente, toman datos de las franjas, combinando las antenas de a pares y formando interferómetros elementales. Así, por ejemplo, seis antenas podrán formar 15 interferómetros diferentes (si se eligen bien las distancias y orientaciones). Si numeramos las antenas del 1 al 6, estas combinaciones se logran apareando

1-2
1-3 2-3
1-4 2-4 3-4
1-5 2-5 3-5 4-5
1-6 2-6 3-6 4-6 5-6

Cuando el interferómetro sigue las fuentes en su movimiento, el ángulo θ , formado entre la Línea de Base y el frente de onda toma cualquier valor entre -90° y 90° . El análisis que hicimos antes respecto al interferómetro elemental solo cubría ángulos de hasta 6° (cuando $\sin(\theta) \sim \theta$). Ahora, con ángulos mayores, aparecerá una proyección (a') de la Línea de Base (a) sobre el plano del Frente de Onda que será



Es esa proyección (a') de la Línea de Base sobre el Frente de Onda la que determinará ahora, para esa dirección θ , la nueva separación angular de las franjas.

Entonces, en general, la distancia entre franjas es

$$\frac{\lambda}{a'} = \frac{\lambda}{a * \cos(\theta)}$$

Fig. 5-19 En el gráfico vemos la esfera celeste. En el centro de ella, nuestro interferómetro. Los sectores coloreados son las franjas con su espesor constante (visto desde afuera). Pero, desde el interior de la esfera, los anchos angulares de las franjas aumentan hacia los "polos", como lo indica la expresión del texto.

