



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

99
24

FACULTAD DE INGENIERÍA

INTERFEROMETRÍA APLICADA A
RADIOASTRONOMIA

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A:

ITHANDEHUI AZIYADÉ MESINAS MARTÍNEZ



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DIRECTOR DE TESIS: M. en C. AMANDA O. GÓMEZ GONZÁLEZ

MEXICO D.F.

1991



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INTERFEROMETRIA APLICADA A RADIOASTRONOMIA

INDICE

	PAG.
CAPITULO I. INTRODUCCION	1
CAPITULO II. INTERFEROMETRIA	4
II.1 Interferometria básica	4
II.1.1 Irradiancia	5
II.1.2 Interferencia	7
II.2 Coherencia	8
II.3 Longitud de coherencia	9
II.4 Interferómetro	10
II.4.1 Interferómetro estelar de Michelson	10
II.4.2 Interferómetro de Hanbury-Brown	12
II.5 Radiointerferometria	16
CAPITULO III SISTEMAS DE RADIOMETRO	22
III.1 Principios de radiometria.	22
III.2 Radiación del cuerpo negro	25
III.3 Introducción al ruido en radiometria	26
III.4 Sensibilidad del radiómetro	27
III.5 Temperatura de ruido en el sistema	28
III.5.1 Medida de la temperatura de ruido	29
III.5.2 Figura de ruido	29
III.6 Potencia total del radiómetro	32
III.7 Radiómetro básico de microondas	34
III.8 Tipos de radiómetros	34
III.8.1 Radiómetro Directo	34
III.8.2 Radiómetro de Dicke	35
III.8.3 Radiómetro de dos referencias	36
III.8.4 Radiómetro con inyección de ruido.	37
III.9 Elección del radiómetro	38

CAPITULO IV.	CARACTERISTICAS DEL RADIOMETRO	41
IV.1	Descripción del modelo	41
IV.2	Etapas de RF	41
IV.3	Etapas amplificadora	43
IV.4	Detección en RF	43
IV.5	Detección sincrónica	44
IV.6	Integrador	45
IV.7	Características de la antena	47
	IV.7.1 Ancho de haz	48
	IV.7.2 Temperatura	50
	IV.7.3 Ganancia	51
	IV.7.4 Directividad	52
IV.8	Características generales del radiómetro	52
	IV.8.1 Ancho de banda	52
	IV.8.2 Ganancia	53
CAPITULO V	EVALUACION DEL RADIOMETRO	54
V.1	Especificaciones	54
V.2	Resultados	55
V.3	Conclusiones	57
CAPITULO VI	APLICACIONES Y PERSPECTIVAS	58
VI.1	Aplicaciones	58
VI.2	Perspectivas	61
BIBLIOGRAFIA		63

CAPITULO I

INTRODUCCION

El desarrollo de instrumentos que sean capaces de sensar características físicas de objetos remotos dentro de su campo promete una revolución en astronomía, oceanografía, medicina, etc.

Es ahora posible cubrir grandes áreas dentro de sus límites llevando este tipo de instrumentos a bordo de aviones, satélites incluso desde tierra. Los instrumentos en cuestión son: el rastreador multiespectral (MSS), el radar (SLR) y el radiómetro de microondas. Esta tesis esta relacionada con el desarrollo de un sistema de radiómetro de microondas y con algunos resultados obtenidos en aplicaciones a *radioastronomía*.

La radioastronomía estudia los astros a partir de las ondas radioeléctricas que emiten. En 1931 la Bell Company de los EEUU le encomendó al ingeniero Carl Jansky, el estudio del mejoramiento de las comunicaciones transoceánicas, para lo cual se instaló un juego de antenas múltiples capaces de ser orientadas; fué así que Jansky observó que en determinada orientación y a la misma hora del día, se operaba un aumento del ruido de fondo que no aparecía en otros momentos. La intensidad de este ruido de fondo presentaba una variación de acuerdo al día sidereal.

En 1937 el físico estadounidense Reber continuó las experiencias suspendidas por Jansky en 1935, y logró hacer con un radiotelescopio de fabricación casera, el primer radiomapa de nuestra galaxia además demostró que la emisión de tal ruido provenía de la vía láctea. Muchas de las radioondas percibidas por Jansky y por Reber ya preocupaban a los radaristas ingleses, que hasta llegaron a interpretarlas como perturbaciones producidas por los alemanes durante los bombardeos aéreos, para anular la captación de los primitivos radares de la época.

Durante la Segunda Guerra Mundial los receptores de radar construidos en Gran Bretaña permitieron captar los ruidos celestes, llamados radio-estrellas.

En los siguientes años se empezó a investigar seriamente las ondas radioeléctricas, constituyéndose en una nueva rama de la astronomía, la *radioastronomía*. La emisión energética de los astros se extiende desde los rayos γ , de corta longitud de onda, hasta las ondas hertzianas; sin embargo, la atmósfera terrestre solo es permeable a las radiaciones comprendidas entre las proximidades del ultravioleta al infrarrojo; mediante los receptores radio-eléctricos se captan desde las ondas kilométricas hasta las micrométricas.

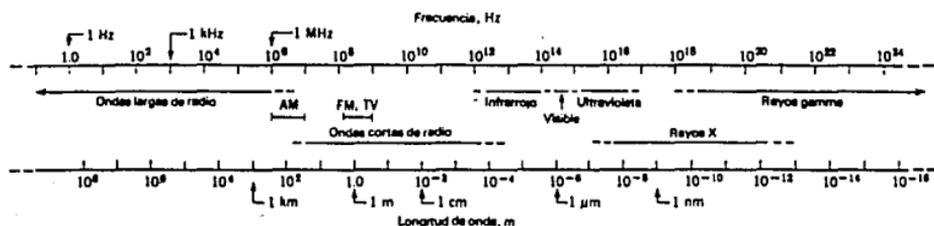


FIG. 1.1 *Espectro electromagnético.*

El estudio más importante que se ha efectuado en radioastronomía es el que concierne al sol: la cromósfera región fuertemente ionizada y que contiene electrones libres, se estudia con dificultad mediante los instrumentos ópticos y en cambio resulta apta para una investigación radioeléctrica.

Uno de los equipos utilizados para realizar este tipo de investigaciones son los interferómetros estelares, los cuales son sistemas basados en la interferencia entre dos rayos de luz sincrónicos, la función de estos interferómetros es medir las dimensiones angulares pequeñas de cuerpos astronómicos lejanos. [REF 8].

En el capítulo II se presentan las bases teóricas de la interferometría, comenzando desde los experimentos de Young, hasta los interferómetros estelares desarrollados por Michelson y Hanbury-Brown; concluyendo este capítulo con la interferometría aplicada a radioastronomía también llamada radiointerferometría.

Los interferómetros estelares son sistemas que pueden ser constituidos por 2 o más radiómetros. En el capítulo III se presentan los principales parámetros que influyen en el funcionamiento de un radiómetro como son: el ruido, la sensibilidad y la temperatura. Después se presenta una clasificación de los radiómetros más usuales, eligiendo al final el que será desarrollado.

En el capítulo IV se describen cada uno de los bloques en los que se compone el sistema de radiómetro elegido. Los resultados y conclusiones obtenidos se presentan en el capítulo V.

Las aplicaciones de los radiómetros en diferentes áreas como medicina, agricultura, astronomía y otras son variadas se presentan las más importantes en el capítulo VI. Así como las perspectivas de las técnicas de interferometría en un futuro no muy lejano, en el cual la tecnología proveerá de la más alta resolución en las observaciones de la tierra.

CAPITULO II

INTERFEROMETRIA

II.1 INTERFEROMETRIA BASICA

Las ondas electromagnéticas transportan energía desde el sol hasta la tierra o desde una hoguera hasta una mano cercana a ella.

Resulta menos común que las ondas electromagnéticas puedan transportar ímpetu. En otras palabras, que sea posible ejercer una presión de radiación sobre un objeto, iluminándolo. En este caso las fuerzas que intervienen deben ser mucho menores que las fuerzas cotidianas, debido a que normalmente no se les nota. Sin embargo los efectos de la presión de radiación son importantes en los ciclos de vida de las estrellas, debido a las temperaturas demasiado grandes asociadas con el interior de las estrellas ($2 \times 10^7 \text{K}$ para el sol). [REF. 14].

El hecho de que la rapidez de las ondas en el espacio vacío en todo el espectro electromagnético tenga el mismo valor de c (velocidad de la luz), es una confirmación experimental significativa de la teoría de Maxwell del electromagnetismo.

En 1905, Einstein resolvió la dificultad para entender la propagación de la luz haciendo un postulado:

"Si cierto número de observadores se mueven con velocidad uniforme unos con respecto a otros y respecto a una fuente de luz, y si cada observador mide la rapidez de la luz que sale de esta fuente todas medirán el mismo valor".

Independientemente de cuál sea la rapidez relativa de la fuente luminosa y del observador, la rapidez medida de la luz es la misma. Sin embargo, las frecuencias y longitudes de onda medidas cambian, pero siempre de tal forma que su producto, que es la velocidad de la luz c permanece constante. Estos corrimientos de frecuencia se llaman corrimientos Doppler, en honor de Johann Doppler (1803-1853) quien las predijo por primera vez.

En la luz se presenta un fenómeno interesante diferente al del sonido, en el caso de que la fuente se aleje del observador es físicamente lo mismo que si el observador se alejara de la fuente y por lo tanto deben exhibir exactamente la misma frecuencia Doppler. Esta frecuencia Doppler predicha por la teoría de la relatividad es:

$$\nu' = \nu \frac{1 - u/c}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \quad [2.a]$$

Donde:

- u. Rapidez con la que la fuente se aleja del observador.
- ν Frecuencia de la fuente.
- c. Velocidad de la luz.
- ν' . Frecuencia Doppler.

Si reemplazamos u por -u se obtienen las relaciones apropiadas cuando la fuente y el observador se acercan.

El efecto Doppler en la luz tiene muchas aplicaciones en la astronomía, en donde se utiliza para determinar la rapidez con la cual los cuerpos luminosos celestes se mueven hacia la tierra o se alejan de ésta. Estos corrimientos Doppler miden únicamente la componente radial o en la línea de visión de la velocidad relativa. Todas las galaxias en las cuáles se han realizado estos experimentos parecen alejarse de la tierra, con una velocidad que es mayor en las galaxias más distantes; estas observaciones son la base del concepto del universo en expansión. [REF 8].

II.1.1 IRRADIANCIA

Una de las propiedades de la onda electromagnética es que transporta energía. La luz de la estrella más cercana viaja 25 millones de millones de millas para llegar a la tierra y aún así lleva suficiente energía para realizar trabajo en los electrones.

En cualquier campo electromagnético existe en alguna región del espacio y se considera como la energía radiante por unidad de volumen, también llamada densidad de energía (u). Considerando el flujo de energía

como *irradiancia resultante*, la cuál se desvía de las irradiancias componentes. La demostración de tales efectos de interferencia en el caso de la luz fueron realizados por Thomas Young en 1801. Young pudo deducir la longitud de onda de la luz a partir de sus experimentos y fueron las primeras medidas de esta importante cantidad. [REF 14].

Analizando en forma cuantitativa el experimento de Young suponiendo que la luz incidente tiene sólo una longitud de onda.

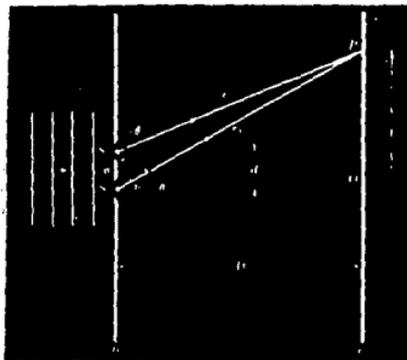


FIG. 2.1 Experimento de Young

P es un punto arbitrario en la pantalla que se encuentra separado a r_1 y a r_2 de las rendijas angostas s_1 y s_2 , respectivamente. Si se traza una línea desde S_2 hasta b de tal manera que las líneas P_s_2 y P_b sean iguales. Si la separación d entre las rendijas es mucho menor que la distancia D entre las dos pantallas entonces S_2b es casi perpendicular tanto a r_1 como a r_2 .

Esto significa que el ángulo S_1S_2b es casi igual al ángulo PaO que en la figura se indica como θ . Esto es equivalente a decir que las líneas r_1 y r_2 pueden considerarse como *paralelas*.

Los dos rayos que llegan al punto P provenientes de S_1 y S_2 se encuentran en fase en las rendijas que actúan como fuentes, ya que los 2 provienen del mismo frente de onda de la onda plana incidente. Debido a que los rayos tienen diferentes longitudes de camino óptico, llegan al punto P con una diferencia de fase.

El número de longitudes de onda contenidas en S_1b que es la

electromagnética, simbolizaremos con S el transporte de energía por unidad de tiempo (la potencia) a través de un área unitaria. A frecuencias ópticas S es una función variable en el tiempo extremadamente rápida y así su valor instantáneo es una cantidad impráctica de medir. Por esta razón se emplean promedios.

Es decir, que absorbamos la energía radiante durante un intervalo finito de tiempo usando, por ejemplo, una fotocelda o la retina del ojo humano.

El valor promedio en el tiempo del vector de Poynting simbolizado por $\langle S \rangle$ será la medida de la irradiancia. (Ecuación 2.c)

$$\langle S \rangle = \frac{c^2 \epsilon_0}{2} |E_0 \times B_0| \quad [2.b]$$

$$I = \langle S \rangle = \frac{c \epsilon_0}{2} E_0^2 \quad [2.c]$$

La irradiancia (I) es por consiguiente proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico. Dentro de un dieléctrico isotrópico homogéneo y lineal la expresión para la irradiancia queda:

$$I = \epsilon v \langle E^2 \rangle \quad [2.d]$$

La rapidez de flujo de la energía radiante es la potencia o *flujo radiante*, generalmente expresado en watts. Si dividimos el flujo radiante que incide o sale de la superficie, tenemos la *densidad de flujo radiante* (W/m^2). En el primer caso se habla de la *irradiancia* y en el último de la *existencia*, y en cualquiera de los dos casos de la *densidad de flujo*.

II.1.2. INTERFERENCIA

Si dos ondas de la misma frecuencia viajan aproximadamente en la misma dirección y tienen una diferencia de fase que permanece constante en el tiempo, se puede combinar de tal forma que su energía no queda distribuida uniformemente en el espacio sino que tiene un máximo en ciertos puntos y un mínimo (o cero) en otros. A esta energía se le conoce

diferencia de camino, determina la naturaleza de la interferencia en P.

Si el patrón de interferencia es observable la diferencia de fase ($c_1 - c_2$) entre las dos fuentes debe permanecer constante en el tiempo.

Tales fuentes son *coherentes*. Dos haces que se superponen y que vienen de emisores separados interferirán, pero el patrón resultante no se sostendrá el tiempo suficiente para ser fácilmente observable. Una fuente típica contiene un gran número de átomos excitados, cada uno capaz de radiar un tren de onda de aproximadamente 10^{-8} s.

Dos fuentes distintas por consiguiente podrían mantener sus fases distintas en el mejor de los casos 10^{-8} s. El patrón de interferencia resultante sería constante en espacio solamente durante ese lapso, antes de que varíe al cambiar la fase, y de ahí en adelante permanecería estable por otro momento, para cambiar de nuevo, y así sucesivamente, sin que se pueda observar el patrón de interferencia resultante.

II.2. COHERENCIA

Es conveniente dividir los efectos de la coherencia en dos clasificaciones, *temporal* y *espacial*. La primera se relaciona directamente con el ancho de banda finito de la fuente, la última con su extensión finita en el espacio.

Si la luz fuera monocromática $\Delta\nu$ sería cero y Δt infinito, pero esto es, inalcanzable. Sin embargo sobre un intervalo mucho más corto que Δt una onda real se comporta esencialmente como si fuera monocromática. El tiempo de coherencia es el intervalo temporal sobre el cual podemos predecir razonablemente la fase de la onda luminosa en un punto dado en el espacio. Esto se entiende por coherencia temporal, si Δt es grande la onda tiene un alto grado de coherencia temporal y viceversa.

La misma característica puede considerarse en forma diferente. Si tenemos dos puntos separados P_1 y P_2 respectivamente ambos sobre un radio trazado de una fuente puntual cuasimonocromática. Si la longitud de coherencia, $c\Delta t$, es mucho más grande que la distancia (r_{12}) entre P_1 y P_2 , entonces un solo tren de onda puede extenderse sobre toda la separación. La perturbación en P_1 estaría altamente correlacionada con las perturbaciones ocurridas en P_2 . Por otra parte, si esta separación

longitudinal fuera mucho más grande que la longitud de coherencia, muchos trenes de onda, cada uno con fases no relacionadas, cubrirían la brecha r_{12} . En ese caso, las perturbaciones en los dos puntos del espacio serían independientes para cualquier punto dado.

El grado para el cual la correlación existe algunas veces se conoce, como *coherencia longitudinal*. Ya sea que se piense en términos del tiempo de coherencia (Δt) o longitud de coherencia ($c\Delta t$), el efecto surge del ancho de banda finito de la fuente.

La idea de coherencia espacial se usa con más frecuencia para describir objetos que surgen por la extensión finita de fuentes de luz ordinaria.

II.3 LONGITUD DE COHERENCIA

Suponiendo que examinamos la luz emitida por lo que ligeramente se denomina una fuente monocromática (Ej: Una lámpara de descarga de sodio). Cuando el haz pasa a través de algún tipo de analizador de espectro seremos capaces de observar sus diferentes componentes de frecuencia. Típicamente encontraríamos que habría ciertos rangos de frecuencia muy angostos que contendrían la mayor parte de la energía y que éstos estarían separados por unas regiones de oscuridad mucho más grande. Cada una de las bandas brillantemente coloreadas se conocen como *líneas espectrales*.

Hay aparatos donde la luz entra a través de una rendija y cada línea en realidad sería una imagen coloreada de tal rendija. Otros analizadores representarían la distribución de frecuencias en la pantalla de un osciloscopio. En todo caso las líneas espectrales nunca serán infinitamente angostas. Siempre consistirán en una banda de frecuencias.

Las transiciones electrónicas responsables de la generación de luz tienen una duración del orden de 10^{-8} s. Debido a que los trenes de onda emitidos son finitos habrá un esparcimiento en las frecuencias presentes conocido como el ancho de banda natural.

Además ya que los átomos están en movimiento térmico al azar el espectro de frecuencia será alterado por el efecto Doppler. Incluso los átomos sufren colisiones que interrumpen los trenes de onda y de nuevo

tienden a ensanchar la distribución de frecuencia. El efecto total de todos estos mecanismos es que cada línea espectral tiene un ancho de banda $\Delta\nu$ en lugar de una sola frecuencia. El tiempo Δt que satisface la ecuación:

$$\Delta\nu = 1 / \Delta t \quad [2.e]$$

recibe el nombre de *tiempo de coherencia*.

Y la longitud Δx dada por:

$$\Delta x = c \Delta t \quad [2.f]$$

es la *longitud de coherencia*.

II.4 INTERFEROMETRO

Un interferómetro es un aparato basado en las interferencias entre dos rayos de luz sincrónicos. Tienen un amplio campo de aplicaciones: medición de deformaciones, dilataciones y espesores, estudio del índice de refracción y de la estructura fina de los rayos espectrales.

II.4.1 INTERFEROMETRO ESTELAR DE MICHELSON

Michelson en 1890 propuso un mecanismo interferométrico el cual es interesante porque fué el precursor de algunas técnicas modernas importantes. La función de este interferómetro estelar es medir las dimensiones angulares pequeñas de cuerpos astronómicos lejanos.

Dos espejos móviles bastante separados M_1 y M_2 recogen rayos que se suponen paralelos de una estrella muy lejana. La luz es entonces canalizada por medio de los espejos M_3 y M_4 a través de las aberturas S_1 y S_2 de una placa y después a través del objetivo del telescopio.

Los caminos ópticos definidos $M_1M_3S_1$ y $M_2M_4S_2$ se hacen iguales de manera que la diferencia relativa del ángulo de fase entre las perturbaciones en M_1 y M_2 es la misma que la diferencia entre S_1 y S_2 . Las dos aberturas generan el patrón de franjas del experimento usual de

Young en el plano focal del objetivo. En este caso no son realmente necesarias la placa y las aberturas; los espejos solos pueden servir como aberturas.

Suponiendo que se apunta el instrumento con su eje óptico hacia una de las estrellas de una configuración de estrellas dobles, que están espaciadas por poca distancia. Los rayos que llegan al interferómetro provenientes de cada una de las estrellas estarán bien colimados a causa de las tremendas distancias involucradas. Si suponemos que la luz tiene un ancho de línea angosto y centrado alrededor de la longitud de onda media λ_0 . Las perturbaciones que salen de S_1 y S_2 de la estrella axial están en fase y formarán un patrón de bandas brillantes y oscuras centrado en P_0 . Los rayos de la otra estrella llegarán con algún ángulo θ , pero esta vez las perturbaciones de M_1 y M_2 (por lo tanto S_1 y S_2) estarán fuera de fase o retardadas un tiempo hw/c como se indica en la figura 2. .

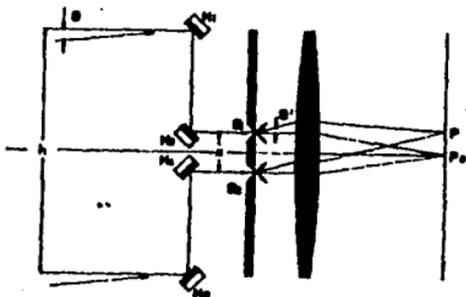


FIG. 2.3 Interferómetro de Michelson

El sistema de franjas resultante centrado en el punto P desplazado por un ángulo θ' de P_0 tal que $h\theta'/c = a\theta'/c$.

Estas estrellas se comportan como si fueran fuentes puntuales incoherentes, las distribuciones individuales de irradiancia se superpondrán. La separación entre las franjas formadas por cualquiera de las estrellas es igual y dependientemente únicamente de a . A pesar de

esto, la visibilidad varía con h . Por consiguiente si h se aumenta de casi cero a $Koh\theta = \pi$ esto es hasta que $h = \lambda_0 / 2\theta$ los dos sistemas de franjas aumentarían su desplazamiento relativo hasta que finalmente el máximo de una estrella se superponga con el mínimo de la otra, posición para la cual si sus irradiancias son iguales $v = 0$. Por consiguiente, cuando las franjas desaparecen uno necesita medir la h para determinar la separación angular θ , entre las estrellas. Nótese que h varía inversamente con θ .

Aunque las fuentes son puntuales, las dos estrellas, se suponen sin correlación alguna, los campos ópticos resultantes para dos puntos cualesquiera (M_1 y M_2) no son necesariamente incoherentes. Para ello, conforme h es cada vez más pequeña, la luz de cada fuente puntual llega a M_1 y M_2 con una fase relativa esencialmente igual a cero; v se acerca a 1 y los campos para esas localizaciones son altamente coherentes.

En la misma forma que un sistema de estrellas dobles, se puede medir el diámetro angular de ciertas estrellas solas. Una vez más la visibilidad de las franjas corresponde al grado de coherencia de los campos ópticos en M_1 y M_2 . Si se supone que la estrella es una distribución circular de fuentes puntuales incoherentes tal que tenga una brillantez uniforme, como ante, uno simplemente mide h para encontrar θ . Se considera buena coherencia cuando se tiene una visibilidad de 0.88 o mejor.

La limitación principal en el uso del interferómetro estelar se debe a la separación tan grande entre los espejos para estudiar cualquier estrella menos para las más grandes. Esto es cierto también en radioastronomía donde se ha usado ampliamente una disposición análoga para medir la extensión de las fuentes con emisiones en radiofrecuencia.

II.4.2 INTERFEROMETRO DE HANBURY-BROWN

Considerando la representación de una perturbación que emana de una fuente térmica (tema anterior). La fuente térmica esta connotada con campos luminosos que surgen predominantemente de la superposición de ondas emitidas espontáneamente y que provienen de muchas fuentes atómicas

La base teórica de este Interferómetro de correlación es la siguiente. Considerando las irradiancias en dos puntos en un campo parcialmente coherente. Los trenes de onda contribuyentes, que nuevamente se representan por campos complejos, se supone que han sido emitidos al azar de acuerdo con una estadística gaussiana con el resultado final de que:

$$\langle I_1(t + \tau) I_2(t) \rangle = \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle + |\Gamma_{12}(\tau)|^2 \quad [2.1]$$

Las fluctuaciones instantáneas de irradiancia ($\Delta I_1(t)$ y $\Delta I_2(t)$) están dadas por las variaciones de las irradiancias instantáneas $I_1(t)$ e $I_2(t)$ sobre los valores medios $\langle I_1(t) \rangle$ e $\langle I_2(t) \rangle$ como en la figura [2.4]

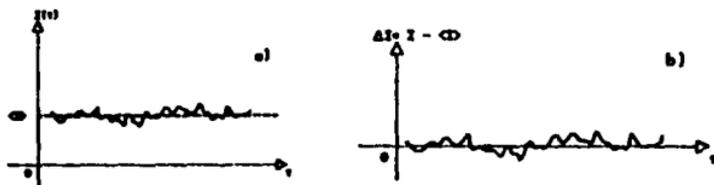


FIG. 2.4. Variaciones de la irradiancia.

Considerando:

$$\langle \Delta I_1(t) \rangle = 0 ; \quad \langle \Delta I_2(t) \rangle = 0 \quad [2.j]$$

y el hecho de que las fluctuaciones instantáneas de irradiancia sean igual a cero. La ecuación [2.j] se convierte en:

$$\langle \Delta I_1(t + \tau) \Delta I_2(t) \rangle = |\Gamma_{12}(\tau)|^2 \quad [2.k]$$

Estas son las correlaciones cruzadas de las fluctuaciones de la irradiancia. Ellas existirán mientras el campo sea parcialmente

coherente en los dos puntos involucrados. Estas expresiones corresponden a luz linealmente polarizada. Cuando la onda no está polarizada, se multiplica el lado derecho por 1/2.

La validez del principio de interferometría de correlación fué establecido por primera vez en la región del espectro para radiofrecuencias donde la teledetección de la señal fue un hecho casi directo. Después Hanbury-Brown y Twiss, en 1956 propusieron el interferómetro óptico estelar (Ver fig. 2.5) Pero los únicos detectores adecuados que pueden usarse en frecuencias ópticas, son los dispositivos fotoeléctricos cuyo modo de operación depende de la naturaleza cuántica de un campo luminoso.

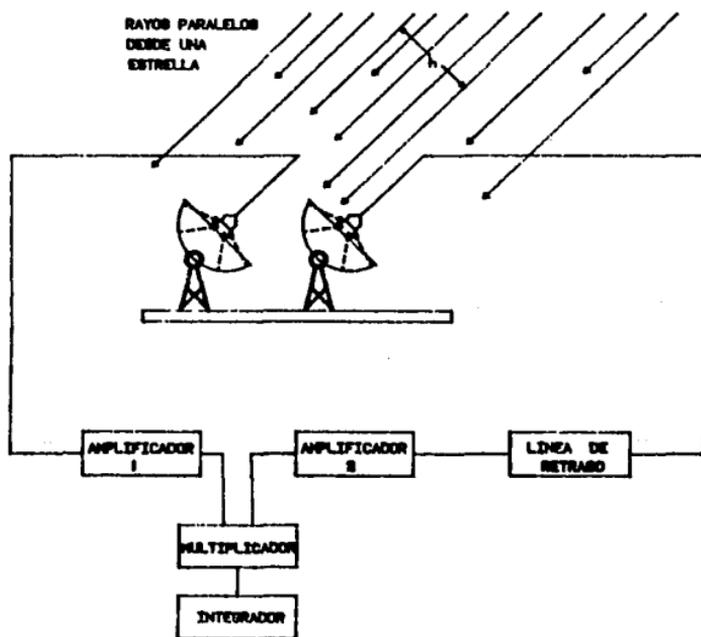


FIG. 2.5. Interferómetro Estelar

En este tipo de interferómetro se usaron espejos de fibras para recoger la luz de las estrellas y enfocarla sobre dos fotomultiplicadores. Un brazo contenía un retraso de línea tal que los espejos pudieron localizarse físicamente a la misma altura y existió incluso una compensación de cualquier diferencia del tiempo de llegada de la luz.

Por ningún medio se pudo asegurar que la correlación sería totalmente conservada durante el proceso de emisión fotoeléctrica. Por esta razón se efectuó un experimento de laboratorio como se describe en la figura 2.5. b.

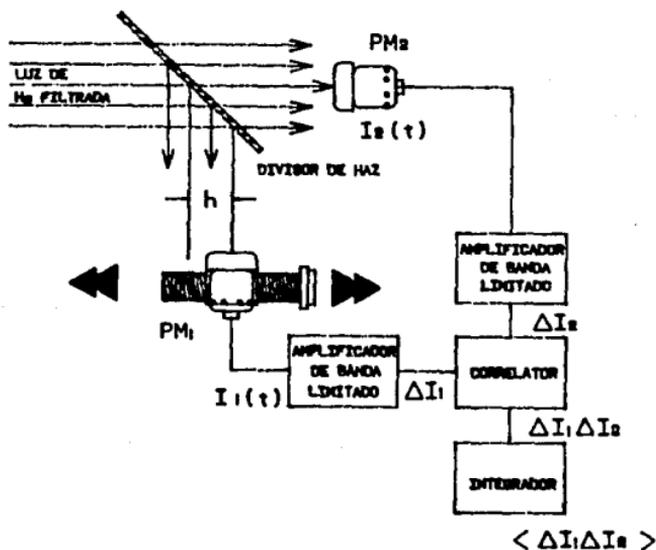


FIG. 2.5 b) Experimento de Hanbury-Brown y Twiss

Las medidas en varias separaciones de los detectores permitirían que el cuadrado del módulo del grado de coherencia $|\gamma_{12}(0)|^2$, se dedujera y éste a su vez diera el diámetro angular de la fuente, justamente como se hizo con el interferómetro estelar de Michelson. Con la diferencia de que en este caso la separación h podría ser muy grande, porque no hay mezcla

de fase en las ondas, como en el Dispositivo de Michelson. Aquí se eliminó la fase y los espejos no tuvieron que ser de gran calidad óptica.

La electrónica comprendida en la correlación de la irradiancia podría simplificarse grandemente si la luz incidente fuera casi monocromática y de densidad de flujo considerable.

II.5 RADIOINTERFEROMETRIA

Consideramos un par de antenas como se muestra en la figura 2.6 situadas en la superficie de la tierra y alineado a una fuente distante radio-cósmica la cual tiene dimensiones angulares muy pequeñas. Suponiendo que cada antena tiene un sistema radio-receptor que admite la misma banda angosta de frecuencias. La fuente es tan distante comparada con el espacio entre antenas que la entrada de los rayos es prácticamente paralela.



FIG.2.6. Sistema de antenas

Ahora tenemos los voltajes de las dos antenas se multiplican juntos y el voltaje resultante pasado a través de un filtro paso-bajas, cuya salida se graba en una gráfica al mismo tiempo.

Como la tierra gira, las 2 antenas generalmente experimentan diferentes velocidades radiales con respecto a la fuente. Si la fuente estuvo emitiendo una onda monocromática esto es, una señal con una sola frecuencia, esta señal podría tener un efecto Doppler en frecuencia en las dos antenas. Entonces la salida del filtro paso-bajas será una onda senoidal cuya frecuencia es igual a la diferencia entre las dos frecuencias Doppler cambiantes. Aunque la fuente de hecho no emite una

frecuencia discreta (a menos que sea una nave espacial) este razonamiento produce la frecuencia correcta de los pulsos. Los cuales representan las salidas del interferómetro.

El margen de frecuencia varía con el ángulo de la fuente y es también una función de otros parámetros del interferómetro y la fuente.

La principal información astronómica de la observación de un interferómetro de una fuente cósmica, está contenida en las amplitudes y fases de los márgenes de interferencia grabadas.

Esto debe ser enfatizado ya que las amplitudes y fases son resultado de la modulación de la interferencia entre las salidas de las dos antenas, y no de la radiación de la radiofrecuencia por sí misma. Otra línea simple de razonamiento involucra la suposición que los receptores pasan una banda de ruido bastante estrecho para obtener la apariencia general de las senoides a la salida, pero bastante ancho para alojar los cambios del efecto Doppler.

La situación geométrica se muestra en la figura siguiente.

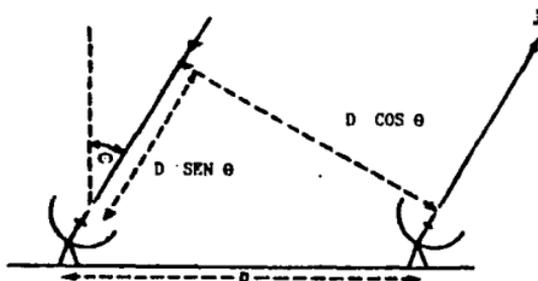


FIG. 2.7 . Situación geométrica de la antena.

Aquí la antena tiene una separación Este-Oeste. Las dos antenas están separadas una distancia D , la línea de base observa la misma fuente cósmica lejana. La fuente será supuesta por el momento para tener dimensiones angulares infinitesimales. Las señales serán multiplicadas y filtradas y el resultado se graba. El frente de onda de la fuente en dirección θ es esencialmente plano debido a la gran distancia viajada y a los alcances de la antena en el tiempo.

independientes.

Un campo óptico cuasimonocromático puede representarse por:

$$E(t) = E_0(t) \cos [c(t) - 2\pi\nu t] \quad [2.g]$$

La amplitud es una función que varía relativamente en forma lenta con el tiempo, como lo es la fase. La onda tal vez sufra algunos miles de oscilaciones antes que la amplitud (es decir, la envolvente de las vibraciones del campo) o la fase cambien apreciablemente. Por lo tanto así como el tiempo de coherencia es una medida del intervalo de fluctuación de la fase, también es una medida del intervalo sobre el cual $E_0(t)$ es medianamente predecible.

Grandes fluctuaciones de c producen grandes fluctuaciones de E_0 . Conociendo estas fluctuaciones de la amplitud de campo se pueden relacionar con las fluctuaciones de fase y por lo tanto con la funciones de correlación (coherencia). Esto es, en dos puntos del espacio-tiempo donde las fases de campo están correlacionadas, esperaríamos también que las amplitudes estuvieran relacionadas.

Cuando existe un patrón de franjas para el interferómetro estelar de Michelson es porque los campos en M_1 y M_2 , las aberturas, están de alguna manera correlacionados.

Esto es:

$$\Gamma_{12}(0) = \langle E_1(t)E_2(t) \rangle \neq 0 \quad [2.h]$$

Si se pudiera medir las amplitudes de los campos en estos puntos, sus fluctuaciones demostrarían igualmente una interrelación. Ya que esto no es práctico por las altas frecuencias que se manejan en lugar de eso se debería medir y comparar las fluctuaciones en la irradiancia para las posiciones de M_1 y M_2 y a partir de ahí inferir $\gamma_{12}(0)$. Si hay valores de τ para los cuales $\gamma_{12}(\tau)$ es diferente de cero, el campo de los dos puntos es coherente parcialmente y queda implicada una correlación entre las fluctuaciones de la irradiancia para esas posiciones.

Esta es la idea esencial de una serie de experimentos que realizaron Hanbury-Brown; la culminación de este trabajo fué el llamado *interferómetro de correlación*.

De la figura 2.7 podemos calcular el retardo geométrico (τ) cómo:

$$\tau = (D / C) \text{ sen } \theta \quad [2.1]$$

Donde:

c. - Velocidad de la luz

D. - Diametro de la antena

Así en términos de la frecuencia ν , la salida del multiplicador es proporcional a:

$$F = 2 \text{ sen } (2\pi\nu t) \text{ sen } 2\pi\nu(t-\tau) \quad [2.m]$$

El centro de frecuencia de los receptores es generalmente en el rango de decenas de MHz a cientos de GHz. Como la tierra gira a una razón más rápida la variación de θ es igual a la velocidad de rotación de la tierra lo cual es del orden de 10^{-4} [rad/seg].

Como la variación de $\nu\tau$ es más pequeño que νt por lo meos 5 veces en magnitud. La variación más rápida en términos de la ecuación [2.1] se filtra y queda:

$$F = \cos (2\pi D/\lambda \text{ sen } \theta) = \cos (2\pi D\xi/\lambda) \quad [2.n]$$

Donde:

$$\xi = \text{sen } \theta \quad [2.ñ]$$

Para una fuente sideral la variación de θ con el tiempo es casi-sinusoidal como el generado en la rotación de la tierra.

La figura 2.8 muestra un ejemplo de esta función, en efecto el patrón de potencia de recepción del interferómetro es direccional. Se supone que las antenas son isotrópicas o que la fuente rota como la tierra de tal forma que los patrones de recepción de las antenas individuales no afectan el resultado [REF 8]

En la figura 2.9 se muestra la respuesta de un interferómetro de una fuente puntual con una función Gaussiana como envolvente. Esta función es frecuentemente referida al patrón de ancho de banda.

En esta figura la abscisa representa el retardo geométrico .

En aplicaciones de mapeo la envolvente se considera con una línea de base muy grande en interferometría.

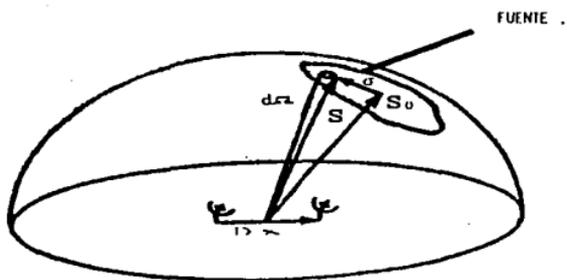


FIG. 2.10. Vista general del interferómetro.

CAPITULO III

SISTEMAS DE RADIOMETRO

III.1 PRINCIPIOS DE RADIOMETRIA

Los radiómetros son instrumentos capaces de detectar niveles de temperatura de ruido mínimos.

Todos los cuerpos materiales cuya temperatura difiere de 0 Kelvin, radian energía en forma de ondas electromagnéticas; también absorben o reflejan esta radiación.

La radiación térmica es la radiación electromagnética emitida por un cuerpo como resultado de su temperatura. La radiación térmica esta comprendida en la región de longitud de onda de 0.1 a 100 [m].

La densidad de flujo radiante total de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Esta relación es conocida como la Ley de Stefan-Boltzmann (radiación ideal) (REF. 9) Se da como:

$$E_b = \sigma T^4 \quad [3.a]$$

Donde:

σ .- Constante de Stefan-Boltzmann

$$(\sigma = 0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h. ft}^2 \cdot \text{°R} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4)$$

E_b .- Densidad de flujo radiante [Btu/h. ft² o W/m²]

T.- Temperatura absoluta °R o K.

La potencia emisiva del cuerpo negro varía con la longitud de onda, de acuerdo a la ecuación de distribución dada por Planck:

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad [3.b]$$

Donde:

$E_{b\lambda}$.- Potencia monocromática del cuerpo negro.

$$\{ \text{Btu/h.ft}^2 \cdot \mu\text{m} \quad \text{o} \quad \text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m} \}$$

λ .- Longitud de onda en μm .

T .- Temperatura [$^{\circ}\text{R}$ o K]

C_1 .- $1.187 \times 10^8 [\text{Btu} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{h.ft}^2] = 3.743 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$

C_2 .- $2.5896 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot ^{\circ}\text{R} = 1.4387 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

Cuando la radiación térmica incide en una superficie del material, se aplica la siguiente relación:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad [3.c]$$

Donde:

α .- Capacidad de absorción o fracción de la radiación incidente absorbida.

ρ .- Fracción de la radiación reflejada.

τ .- Fracción transmitida.

Para la mayoría de los materiales sólidos $\tau = 0$ de modo que:

$$\alpha + \rho = 1 \quad [3.d]$$

La emisividad (c) se define como:

$$c = \frac{E}{E_b} \quad [3.e]$$

Donde:

E .- Potencia emisiva de la superficie real.

E_b .- Potencia emisiva de un cuerpo negro a la misma temperatura.

La potencia emitida es también dependiente de la emisividad del material.

c es la fracción de potencia emitida por el objeto en cuestión comparada con la radiación de un emisor perfecto - un cuerpo negro- el mismo de la temperatura física. Es generalmente dependiente de la frecuencia.

El cuerpo absolutamente negro radia energía con un brillo que podemos calcular como sigue según la ley de Planck [REF 3] :

$$B = \frac{2hf^3}{2} \left[\frac{e^{kT} - 1}{hf} \right] \quad [W/m^2 \cdot Hz \cdot sterad] \quad [3.f]$$

Donde:

- h.- Constante de Plank $[6.63 \times 10^{-34}]$
- f.- Frecuencia [Hz]
- c.- Velocidad de la luz en el vaclo. $[3 \times 10^8 \text{ m/s}]$
- T.- Temperatura absoluta [K]
- K.- Constante de Boltzmann $[1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}]$
- B.- Brillo

El flujo de potencia [W] que pasa por el área A $[m^2]$ será:

$$W = \pi AB \quad [W] \quad [3.g]$$

La potencia total radiada en ángulo sólido será:

$$W = 1/2 A_{ef} B \Omega \Delta f \quad [W] \quad [3.h]$$

Donde:

- A_{ef} .- Area efectiva de apertura de una antena.
- Ω .- Angulo sólido
- Δf .- Banda de frecuencia [Hz]

Las antenas con un patrón de radiación que tenga un sólo lóbulo principal, reciben energía del ángulo sólido Ω , que es proporcional al producto de dos dimensiones angulares perpendiculares θ y ϕ determinadas al nivel medio de potencia (-3 dB).

$$\Omega = 4/3 \theta \phi \quad [3.i]$$

Los detectores de radiación térmica se calibran en forma directa por medio de la obtención de la salida como una función de la radiación conocida de una fuente de cuerpo negro.

III.2 RADIACION DEL CUERPO NEGRO

Al final del siglo XIX, la teoría electromagnética de la luz hecha por Maxwell y verificada por Hertz, se estableció firmemente como uno de los pilares de la ciencia. Pero en 1900 Max Planck cambió radicalmente el modelo del universo físico. Planck estaba trabajando en un análisis teórico de un fenómeno oscuro conocido como radiación del cuerpo negro. Se sabe que si un objeto de algún tipo está en equilibrio térmico con su ambiente, debe emitir tanta energía radiante como la que absorbe, se deduce que un buen absorbente es un buen emisor.

Un absorbente perfecto, uno que absorbe toda la energía radiante que incide sobre él, independiente de la longitud de onda, se dice que es un *cuerpo negro*. (REF 8).

Generalmente, uno aproxima un cuerpo negro en el laboratorio por una cavidad aislada (un horno) que contiene un agujero pequeño en la pared. La energía radiante que entra al agujero pequeño tiene poca oportunidad de reflejarse hacia afuera de nuevo de tal manera que la cavidad actúa como un absorbente casi perfecto.

Una fuente de cuerpo negro típica se construye como se muestra en la figura. (REF 9):

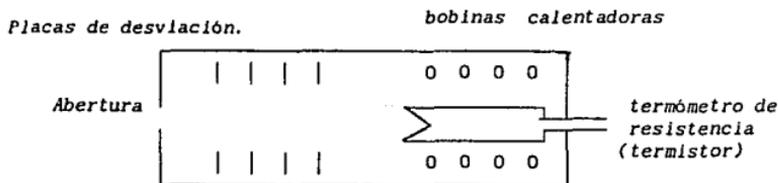


FIG. 3.1 Fuente de cuerpo negro.

La cavidad cónica se construye con material de alta conductividad como el cobre o el aluminio, y la superficie interior se ennegrece. Un calentador eléctrico mantiene la cavidad a una temperatura deseada que se indica y controla por medio de un termómetro sensible de resistencia o termistor. Se instalan placas desviadoras cerca de la abertura para evitar que la radiación dispersa de los alrededores influya en la salida

de radiación de la cavidad.

Puede observarse que las cavidades como la analizada pueden producir emisividades efectivas dentro del 1% de las condiciones de cuerpo negro .

La distribución espectral de la energía radiante será dependiente de la temperatura absoluta T del horno. Conforme la temperatura aumenta, el agujero irradiará al principio de modo predominante en el infrarrojo y tomará gradualmente un brillo rojizo débil que se irá haciendo más brillante cambiándose hasta el amarillo, el blanco y finalmente el blanco azulado.

III.3 INTRODUCCION AL RUIDO EN RADIOMETRIA

Radiometría es la medida de radiación recibida. Por lo tanto el ruido en radiometría será la medida de ruido electromagnético recibido en la radiación [REF 1].

Toda interacción entre una partícula cargada y la energía debe cambiar el estado de movimiento de la partícula esto produce una onda electromagnética radiada. Las partículas cargadas son las bases de toda materia y toda materia en el mundo real contiene y recibe energía, por lo tanto toda materia estará continuamente radiando ondas electromagnéticas.

Hay un enorme número de partículas cargadas (aproximadamente 10^{23} por cm^3) en una pieza de materia, la radiación emitida consiste de un número muy grande de ondas diferentes de todas las frecuencias. Por analogía con el caso acústico, esta radiación se conoce como *ruido*.

Cuando la energía en la materia es bastante alta (Ej: alta temperatura) la radiación es directamente observable como calor y luz. Las ondas de radiofrecuencia sin embargo, son también radiadas y pueden ser detectadas con el equipo apropiado. Así de algún punto en el universo, un origen general de ruido de radio puede ser detectado en regiones de radiación aumentada debido a que la materia y las concentraciones de energía requieren de equipo especial para obtener buena resolución.

Esta resolución espacial requerida se obtiene con antenas directivas. El ruido en radiometría consiste de simples medidas en los cambios de potencia de ruido reunido por una antena. Las medidas son

usadas para deducir hipótesis acerca de las fuentes.

III.4 SENSIBILIDAD DEL RADIOMETRO

Usualmente las densidades de energía de ruido recibidas son muy pequeñas y el área colectora es limitada; así las medidas pueden ser hechas solo directamente en versiones amplificadas de las señales. La combinación de antena, amplificador y registro de salida en el radiómetro y hay limitaciones fundamentales en su funcionamiento.

Todos los componentes en el radiómetro generan potencia de ruido eléctrico que contribuye al ruido de salida del sistema. Así el sistema de salida contiene ambos, ruidos generados dentro del sistema y el ruido recibido por la antena. Los dos elementos son inseparable para solucionar este problema, se puede comparar la calidad estática de dos registros independientes de salida.

La confianza en el resultado con este tipo de comparación puede darse por la medida de la sensibilidad en el radiómetro.

La *sensibilidad* (REF 1) del radiómetro es el cambio más pequeño en el sistema de la potencia de ruido de entrada que puede ser detectada en la salida del sistema. Este parámetro es tomado para igualar la incertidumbre en medida de la potencia de ruido de salida con la fuente apagada referida al sistema de entrada y es:

$$\Delta T = K T_s \left(\frac{2B_n}{B} \right)^{1/2} = K T_s / (Bt)^{1/2} \quad [K] \quad [3.J]$$

Donde:

- T_s.- Temperatura de ruido del sistema.
- B .- Ancho de banda antes de la detección.
- B_n.- Ancho de banda final después de la detección.
- K .- Es un factor cercano a la unidad que es ajustado por el sistema de radiómetro.
- t .- Es el tiempo de integración del medidor.
- ΔT.- Diferencia de temperatura.

Al diseñar el radiómetro se busca obtener un comportamiento tan

cercano como sea posible a la teórica ΔT .

La cantidad de energía radiada de un cuerpo es calculado de los resultados de estadística mecánica. En el diseño del radiómetro el resultado más importante es la potencia de ruido de una carga resistiva.

Aunque hay muchas otras fuentes de ruido, casi siempre son referidas a las condiciones de una resistencia que produce los mismos efectos.

Esta potencia de salida es obtenida por el Teorema de Nyquist el cual establece que la potencia de ruido de una resistencia es obtenida por:

$$P_N = KTB \text{ [W]}$$

[3.k]

Donde:

K.- Constante de Boltzmann

$$(K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})$$

T.- Es la temperatura absoluta de la resistencia.

B.- Es el ancho de banda [Hz]

III.5 TEMPERATURA DE RUIDO EN EL SISTEMA

La expresión "temperatura de ruido" es usada para definir la potencia de ruido equivalente de un resistor a una temperatura constante". Esta potencia es directamente proporcional a la temperatura. Mientras las resistencias tienen temperaturas uniformes son usadas como estándares de ruido, la temperatura equivalente de ruido frecuentemente no lleva una relación con la temperatura física.

Como por ejemplo, una antena con una temperatura de ruido de 25 [K] en la cual la temperatura física sólo existe en el Helio y el Hidrógeno como gases) y una fuente de ruido de 100 000[K] en la cual la temperatura física sólo existe en las partículas fundamentales).

La salida de un sistema de temperatura de ruido equivalente T_s debido solo al ruido generado internamente es obtenido por:

$$P_N = KT_s B G \text{ [W]}$$

[3.1]

Donde:

G .- Ganancia del sistema.

PN.- Potencia de ruido.

III.5.1 MEDIDA DE LA TEMPERATURA DE RUIDO DEL SISTEMA.

METODO FACTOR Y

Si se tiene una resistencia con una temperatura conocida T_1 y se conecta a la entrada de un sistema con una temperatura de ruido T_s , la potencia de ruido (P_{N1}) es:

$$P_{N1} = K (T_s + T_1) BG \quad [3.m]$$

Igualmente para una resistencia T_2 tenemos:

$$P_{N2} = K (T_s + T_2) BG \quad [3.n]$$

Si obtenemos la razón de las dos salidas:

$$Y = \frac{P_{N1}}{P_{N2}} = \frac{T_s + T_1}{T_s + T_2} \quad [3.ñ]$$

Por lo tanto la temperatura del sistema es:

$$T_s = \frac{T_1 - Y T_2}{Y - 1} \quad [3.o]$$

Este método es el factor Y da la medida de la temperatura de ruido y es usado casi universalmente.

El método descrito sólo realiza medidas de temperatura de la entrada del sistema y no incluye el efecto de la antena.

III.5.2 FIGURA DE RUIDO

Esta figura es otra forma muy común de caracterizar los efectos del sistema de ruido. El factor de ruido F de un sistema cuando este opera a

una temperatura ambiente T_0 , la potencia de ruido de salida del sistema es:

$$P_N = FGKT_0B \quad [W] \quad [3.p]$$

Usando el concepto de temperatura de ruido para las mismas condiciones dadas:

$$P_N = GK (T_s + T_0)B \quad [W] \quad [3.q]$$

Igualando esto a dos potencias de salida:

$$T_s = T_0 (F - 1) \quad [3.r]$$

Para medir el factor de ruido F el método factor Y descrito es utilizado; obteniendo la siguiente expresión para el sistema.

$$F = \left[\frac{T_2}{T_0} - 1 \right] + (Y - 1) \quad [3.s]$$

EFFECTOS DE RUIDO EN ATENUADORES

Sucede frecuentemente que la antena y el amplificador de bajo ruido de un sistema de radiómetro se conectan por medio de componentes con pérdidas. Por esta razón se consideran los efectos de ruido en atenuadores.

Se consideró el caso muy elemental en el cual dos resistencias a temperatura T_0 se conectan por medio de un atenuador con una pérdida L donde:

$$L = P_{entrada} / P_{salida} \quad [3.s']$$

El sistema está a una temperatura en equilibrio, esto es, que todas las partes están a la misma temperatura T_0 . (Fig. 3.2)

La potencia que disipa la resistencia A es:

$$P_A = KT_0B \quad [W] \quad [3.t]$$

la cual pasa a través del atenuador, y es la que absorbe la resistencia B. El atenuador absorbe algo de la potencia y sólo P_B son disponibles para la resistencia B.

$$P_B = K T_0 B / L \quad (W) \quad [3.u]$$

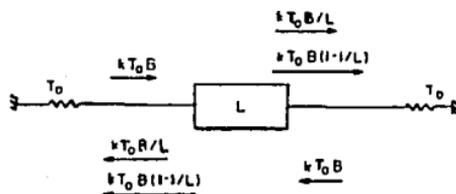


fig. 3.2 Sistema con atenuador

Pero esta resistencia esta transmitiendo $K T_0 B$ [W] de potencia con respecto a la resistencia A.

Así en la descripción del sistema $K T_0 B$ [W] son dejados por la resistencia y $K T_0 B / L$ [W] están entrando en el amplificador, más potencia se deja en una parte del sistema que la que esta entrando en él, lo cual implica que esta parte es más fría.

Esto es imposible; para realizar la descripción adecuada debemos encontrar una fuente que proporcione potencia a la resistencia B. El único lugar para esta potencia de ruido debe ser desarrollada en el atenuador mismo. Así, en esta situación en equilibrio, el atenuador proporciona $K T_0 B (1 - 1/L)$ [W] a la resistencia B.

La temperatura de ruido del atenuador (Esta temperatura en la resistencia de entrada debe tener que producir la misma salida de un atenuador que no genera ruido es decir:

$$T_{att} = T_0 (L - 1) \quad [3.v]$$

y la figura de ruido es:

$$F_{att} = L \quad [3.w]$$

$$F_{att} = L$$

[3.w]

Aunque esta deducción puede verse artificial el resultado describe la situación real exactamente.

Si el atenuador conecta dos cargas a temperaturas diferentes (con propiedad de aislamiento para prevenir el flujo de calor actual a través del sistema), el atenuador afecta al sistema justo como se describe y esta potencia de ruido de salida tiende a calentar la carga mientras el atenuador mismo tiende a ser calentado por la potencia de la carga.

La temperatura controla las diferentes porciones del sistema manteniendo una condición casi equilibrada.

III.6 POTENCIA TOTAL DEL RADIOMETRO

La temperatura del sistema (T_s), la cual incluye la señal de ruido de la antena, las pérdidas de la línea de entrada y el ruido generado internamente, produce una salida P . P y T_s son relacionados por la constante de ganancia del sistema G tal que:

$$P = T_s G$$

[3.x]

G contiene muchos factores, incluyendo la constante de Boltzmann, la ganancia del sistema, ancho de banda, etc. El sistema es lineal, un cambio en T_s produce un cambio proporcional en P .

Como se mencionó antes, una observación radiométrica consiste en observar los cambios de la potencia y relacionarlos con los cambios en la temperatura del sistema, a través de la ganancia G . los cambios en P son encontrados tomando la diferencial de la ecuación [3.x].

$$dP = G dT_s + T_s dG$$

[3.y]

Lo cual es equivalente al cambio de la temperatura de entrada:

$$dP/G = dT_s + (T_s dG / G)$$

[3.z]

En un sistema ideal (dG/G) tendrá un valor de cero y solo habrá cambios en la temperatura del sistema dTs , esto contribuye a la variación de P (dP). En este caso solo el ruido del sistema limita detectar dTs obtenido por ΔTs , la sensibilidad ideal del sistema. Si $dTs \geq 2\Delta Ts$, se tendrá una señal genuina con una probabilidad del 95%.

Si la ganancia cambia durante una observación podría haber una señal con espurias obtenida por:

$$S_{SP} = Ts (dG/G) \quad [3.a']$$

Esta señal tendrá que ser menor que ΔT , si no fuere éste el caso opacaría a las señales observadas de interés, esto es:

$$Ts(dG/G) < \Delta Ts \quad [3.b']$$

Sustituyendo el valor de ΔTs de la ecuación [3.j] tenemos:

$$dG/G < (2Bn/B)^{1/2} \quad [3.c']$$

Actualmente los amplificadores de bajo ruido tienen un valor del factor dG/G aproximado de 10^{-2} (cien veces más grande que el criterio de estabilidad). En otras palabras, las fluctuaciones de ganancia pueden producir fluctuaciones en la salida cien veces más grande que ΔT en la potencia total del radiómetro. Si las fluctuaciones en ganancia son regulares, una señal de espurias es producida; si son aleatorias, la temperatura de ruido del sistema es incrementado efectivamente.

Ahora si queremos conocer sólo la potencia de la antena ésta podrá ser calculada como se indica en el siguiente párrafo.

Si la antena tiene una resistencia de radiación activa, será localizada una caja absorbente con temperatura T . De la ecuación [3.k], la densidad de potencia de salida será:

$$W = \frac{kT A_{ef} \Omega_A}{\lambda^2} \quad [W/Hz] \quad [3.d']$$

La densidad de flujo de potencia que pasa por el área de apertura de

la antena, es:

$$S = \frac{2kT_A}{A_{ef}} \quad [W/m^2 \cdot Hz] \quad [3.e']$$

y la temperatura efectiva en la salida de la antena depende del diámetro relativo de la fuente de radiación.

$$T_A = T \frac{\Omega_s}{\Omega_A} \quad [3.f']$$

III.7 RADIOMETRO BASICO DE MICROONDAS

Los radiómetros son instrumentos capaces de detectar niveles de temperatura mínimos. Generalmente su estructura tiene 3 elementos básicos:

1.- *Filtro pasa-banda.*

Que determina la parte del espectro de interés, determinado por la frecuencia central f , y por el ancho de banda B .

2.- *Detector.*

Usualmente cuadrático, generalmente complementado con un receptor o amplificador de bajo ruido.

3.- *Filtro pasa-baja o Integrador.*

Este filtro deberá minimizar la distorsión en amplitud y fase. El integrador controla el tiempo de observación de la fuente. Si la fuente es muy débil necesitamos un tiempo de integración muy grande.

III.8 TIPOS DE RADIOMETROS

III.8.1 RADIOMETRO DIRECTO. (Radiómetro de potencia total)

La señal de salida puede ser representada como:

$$V_{out} = (T_A + T_M) G \quad [3.g']$$

y es totalmente dependiente de T_N tanto como de G lo cual no es conveniente ya que ellos no pueden ser considerados como suficientemente estables con respecto al tiempo y normalmente el ruido es mucho más grande que la señal. Un significativo mejoramiento es obtenido por el radiómetro de Dicke. [REF 7].

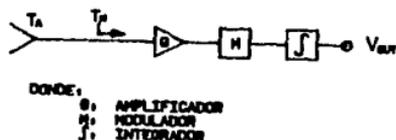


FIG. 3.3 Radiómetro directo

Para evitar el ruido y otras inestabilidades se emplea la modulación de temperatura que pasa de la antena a la entrada del radiómetro.

El tipo más conocido de radiómetro con modulación es el radiómetro Dicke.

III.8.2 RADIOMETRO DE DICKE

El conmutador entre la entrada y la temperatura de referencia (T_{ref}) toma lugar a una frecuencia mucho más alta que la frecuencia más alta en el espectro asociado con las inestabilidades de G y T_N . Ahora:

$$V_{out} = (T_A + T_N) G - (T_{ref} + T_N) G \quad [3.1']$$

$$V_{out} = (T_A - T_{ref}) G \quad [3.1'']$$

Se observa que T_N ha sido eliminada mientras G aún esta presente aunque con menos peso y en el caso especial de T_A igual a T_{ref} la dependencia de G es además eliminada. Por lo anterior notamos que el principio de Dicke es dependiente de la disponibilidad de la temperatura de referencia en microondas de gran estabilidad. Una buena definición de

la temperatura estabilizada a la temperatura física igual a T_{ref} será la de trabajo.

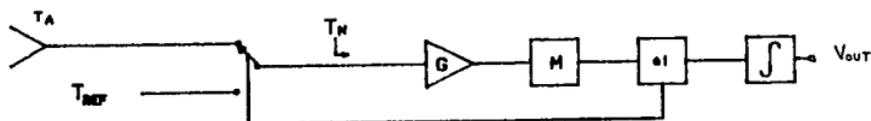


FIG. 3.4. Radiómetro de Dicke

Donde:

- G .- Amplificador.
- M .- Modulador.
- ±1.- Detector.
- ∫ .- Integrador

Dos formas esencialmente diferentes de alcanzar exactitud absoluta serán indicados: uno que la temperatura de referencia es regulada para ser igual a T_A ; G se mide continuamente y se establece un procedimiento de corrección.

III.8.3 RADIOMETRO DE DOS REFERENCIAS

En resumen tenemos una salida normal de un radiómetro de Dicke con:

$$T_{ref} = \frac{TR_1 + TR_2}{2} \quad [3.J']$$

$$V_k = (TR_1 - TR_2)G \quad [3.k']$$

Donde TR_1 y TR_2 son conocidas y G puede ser calculada y usada para corregir la señal de salida normal V_{out} .

Este tipo de radiómetro es bastante atractivo, ya que se basa en el radiómetro de Dicke. Se presenta un problema cuando se requiere establecer dos referencias con preferencia para las diferencias grandes

de temperatura en un sistema de radiómetro no estacionario (avión). Las dos referencias del radiómetro resuelven el problema de la ganancia G pero presenta dificultades con pérdidas y reflexiones en microondas.

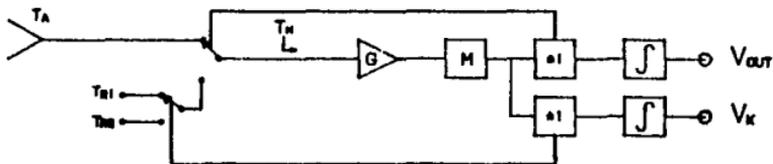


FIG. 3.5 Radiómetro de dos referencias

Donde:

G .- Amplificador.

M .- Modulador.

$\pm I$.- Detector.

\int .- Integrador.

III.8.4 RADIOMETRO CON INYECCION DE RUIDO

Como se mencionó antes el método alternativo para alcanzar absoluta seguridad implica la regulación de la temperatura de referencia T_{REF} para igualarla a T_A . T_A siempre es de un valor bajo, aproximadamente 100K, y es mucho más baja que T_{REF} .

Como consecuencia T_{REF} se cambia para ser de un valor alto y constante, mientras que una variable de temperatura T_i se suma a T_A de tal manera que $T_A' = T_A + T_i$ es igual a T_{REF} .

La parte básica de este sistema es ahora un radiómetro Dicke que mide $T_A' = T_{REF}$ y la señal de salida es $V_{out} = 0$ independiente de G . Cuando T_A varíe T_i debe ser regulado hasta obtener la igualdad con la temperatura de referencia .

La seguridad absoluta es independiente del radiómetro básico pero dependiente de la seguridad con la que T_i sea conocida.

T_r es inyectado en la señal entre la antena y la entrada del radiómetro Dicke, y esto es hecho con un acoplador direccional con un coeficiente de acoplamiento bajo para no influir en la señal de la antena.

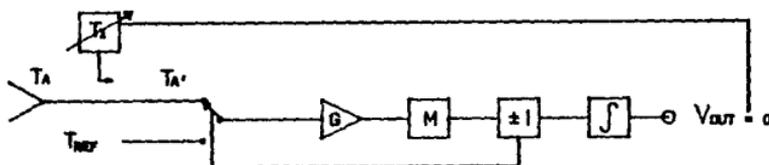


FIG. 3.6 Radiómetro con inyección de ruido.

Donde:

- M.- Modulador
- G.- Ganancia.
- ± 1 .- Detector
- \int .- Integrador

Este método de inyección requiere una temperatura muy alta en microondas. Con los diodos hechos a base de semiconductor se obtienen señales de ruido altas y bien especificadas.

Este radiómetro tiene la ventaja de ser independiente de las pérdidas y reflexiones de la señal.

El sistema radiométrico consiste en un radiómetro y una antena apropiada. Los parámetros se definen según las aplicaciones.

III.9 ELECCION DEL RADIOMETRO

El radiómetro será diseñado de acuerdo al principio de Dicke. Según las especificaciones para cada uno de los radiómetros se pueden resumir sus características en la tabla 3.1.

TIPO DE RADIOMETRO	PRINCIPALES CARACTERISTICAS
Directo	<ul style="list-style-type: none"> - Dependiente de la temperatura de ruido y de la ganancia. - No son suficientemente estables con respecto al tiempo. - Ruido más grande que la señal.
Dicke	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliza modulación de temperatura. - No depende de la temperatura de ruido T_N - Si $T_{REF} = T_N$ no depende de la ganancia - Depende de la temperatura de referencia
De 2 referencias	<ul style="list-style-type: none"> - T_{REF} regulada para ser igual a T_A. - G se mide continuamente y se establece un proceso de corrección. - Presenta dificultades con pérdidas y reflexiones en microondas.
Con inyección de ruido	<ul style="list-style-type: none"> - Exactitud independiente del radiómetro básico. - Depende de la seguridad con que T_i sea conocida.

TABLA 3.1 Comparación de radiómetros

Se puede observar que el radiómetro de inyección de ruido presenta mayores ventajas con respecto a los otros el único inconveniente es que por el tipo de dispositivos que se utilizan en su construcción resultan ser de un precio muy alto.

El radiómetro directo es muy práctico y de bajo costo pero tiene la desventaja que depende totalmente de la temperatura de ruido del sistema.

Por lo tanto entre el radiómetro de dos referencias y el de Dicke podemos decir que aunque los dos son dependientes de la temperatura de referencia, el radiómetro de dos referencias precisamente por ser de dos referencias es más susceptible a tener pérdidas y reflexiones mayores.

Para el objetivo de esta tesis el radiómetro Dicke cumple con los principales parámetros que se requieren, ya que es de un costo medio, de gran estabilidad, y la exactitud del radiómetro puede ser controlada.

CAPITULO IV

CARACTERISTICAS DEL RADIOMETRO

IV.1 DESCRIPCION DEL MODELO

El diseño de este radiómetro se realizará por la técnica de Dicke que es una de las más conocidas dentro de todos los tipos de radiómetros que existen. El diagrama de bloques general de este sistema se muestra en la figura 4.1.

El sistema esta compuesto basicamente de los siguientes elementos, antena, modulador, convertidor, detector en FI, un amplificador, detector sincrono, integrador y amplificador de DC. En este capitulo se dará una explicación de cada bloque así como sus características necesarias para el buen funcionamiento del sistema.

IV.2 ETAPA DE RADIOFRECUENCIA

La elección de la primera etapa de RF es definida por la ΔT requerida, que depende del ancho de banda en RF y el tipo de observaciones planeadas. Esta es una de las partes más caras de un radiómetro.

Idealmente la ΔT requerida del sistema será especificado por el ancho de banda obtenido en las observaciones y por el tiempo en que estas se realizen. Esto dependerá de la temperatura de la antena, de la temperatura del amplificador y de las pérdidas en la línea.

En la práctica el mejor factor ΔT es obtenido con un ancho de banda muy amplio y un tiempo de integración muy corto.

El valor de ΔT limite es función de las características de la antena y de la distribución de las fuentes.

La expresión de la sensibilidad del radiómetro implica tres formas de reducir ΔT . [Ver ecuación 3.J]

Estas son: incrementando el ancho de banda del sistema, incrementando el tiempo de integración y reduciendo la temperatura del sistema.

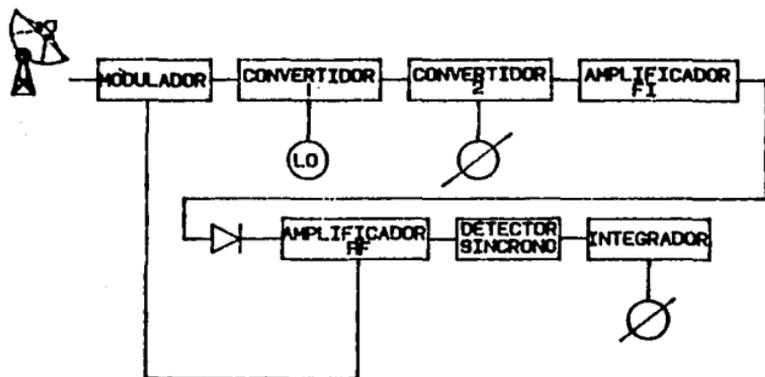


FIG. 4.1 Diagrama del radiómetro.

En algunos casos el ancho de banda puede ser incrementado, sin embargo, en algunas observaciones el incrementar B no ayuda del todo.

Incrementando el tiempo de integración es aceptable pero el costo del tiempo de observación o la incertidumbre producida por largo tiempo dan inestabilidades al sistema y puede ser una limitación. Como consecuencia lo que se hace es forzar la temperatura de ruido a que sea muy baja. [Ver sección IV.8].

IV.3 ETAPA AMPLIFICADORA

Los amplificadores contruidos a base de transistores son utilizados para frecuencias arriba de 8 GHz con anchos de banda amplios. (En un rango de 500 MHz - 1GHz). El rango de temperatura de ruido es de 200 K a 1000 K dependiendo de la frecuencia. Este tipo de amplificadores son sencillos, disponibles y tienen un buen rango dinámico de trabajo.

En nuestro caso se utilizó un amplificador comercial.

IV.4 DETECCION EN RF

Cuando se presentan pequeños cambios en la potencia de entrada, tenemos cambios de voltaje de DC a la salida del detector y éste es proporcional al cambio de la potencia de entrada, en este caso, a el cambio en la temperatura de ruido del sistema.

Será necesario inyectar una señal de calibración conocida para comparar con el correspondiente cambio en la señal.

La fracción del error medida en la ganancia debido a la incertidumbre en la salida es del orden de:

$$T_{sig} / T_{cal} (2B_n/B)^{1/2} \quad [4.a]$$

Para sistemas de banda ancha el factor anterior es aproximadamente 10^{-4} y las señales con calibración de 1% la temperatura del sistema produce el 1 % de error en la medida de la ganancia.

Para sistemas de banda angosta, por supuesto el efecto es más pronunciado. El procedimiento usual es usar una señal con una

calibración del 10 % de la temperatura del sistema.

Para evitar la incertidumbre debida a los cambios de las características del detector en señales de calibración más grandes, es usual trabajar en una de las dos porciones del detector en donde las características son más conocidas.

IV.5 DETECCION SINCRONA

En el radiómetro Dicke la salida de DC del detector se modula a la razón de conmutación del radiómetro y la modulación es proporcional a la diferencia de temperatura entre la antena y la carga de referencia. La detección sincrona es un método para obtener está modulación a baja frecuencia de ruido. El detector sincrono tiene polarización contraria al interruptor y opera en sincronía con la entrada del conmutador y rectifica la señal modulada.

La salida es entonces una señal de DC de compensación "offset" junto con ruido aleatorio. La operación es ilustrada en la fig. 4.2 la cual indica las diferentes formas de onda en diferentes secciones del radiómetro.

La fig. 4.2 muestra la modulación Dicke en la cual se aplicó una señal cuadrada al detector sincrono. Para llegar a esta situación se requiere algo de cuidado: ya que algunas veces solo la primera armónica de la onda cuadrada llega al detector sincrono.

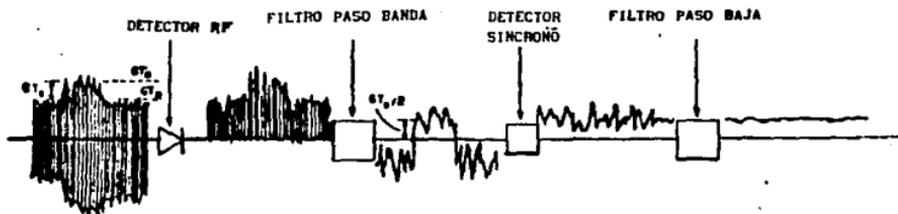


FIG. 4.2 Formas de la señal en diferentes secciones

En tal caso la salida de DC del detector sincrono es el medio para evaluar la onda rectificadada de la primera armónica la cual es $8/\pi^2$ veces

la salida cuando la onda completa es utilizada.

Desde el ruido aleatorio en el filtro paso baja de salida es eliminado. ΔT efectivamente es incrementado $\pi^2/8$ comparado con la onda cuadrada completa, o $\pi^2/4$ veces ΔT de un sistema ideal de potencia total.

La razón de que algunas veces sólo la primera armónica de la onda cuadrada llega al detector síncrono es que el ancho de banda de audio frecuencia es limitado después del detector de RF se reduce el rango dinámico necesario. Los filtros paralelos han sido utilizados sucesivamente para seleccionar la primera, la tercera, y quinta armónicas de la onda cuadrada y para reducir el ancho de banda de ruido produciendo un problema de sobrecarga.

Ocasionalmente el interruptor Dicke produce una modulación de una onda senoidal en lugar de una onda cuadrada. En tal caso una onda senoidal de amplitud $GT_s/2$ llega al detector síncrono y la salida de DC es el medio para evaluar la onda rectificada. Por ejemplo: GT_s/π entonces ΔT es $\pi/2$ más grande que con la señal cuadrada pasada por el detector síncrono, o π veces ΔT de un sistema con potencia total ideal.

IV.6 INTEGRADOR

El integrador es un filtro paso bajas y la relación entre el ancho de banda de ruido B , es equivalente al tiempo de integración τ y puede ser obtenido de la fórmula siguiente:

$$B = 1/\Delta\tau \quad [4.b]$$

En el diseño actual el tiempo de integración analógico es 5 [ms]. El integrador no presenta el factor dominante en la función de transferencia total del radiómetro.

El diseño de este radiómetro se realizó para banda C (4 - 6 GHz).

El detector FI se compone en una parte en el amplificador de alta frecuencia para evitar interferencias. [Ver figura 4.3]

El detector síncrono, el integrador y el amplificador de DC están

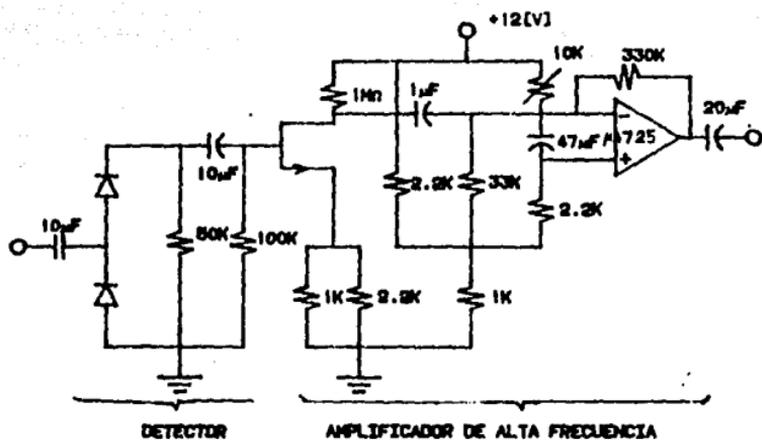


FIG. 4.3·Detector y amplificador de alta frecuencia.

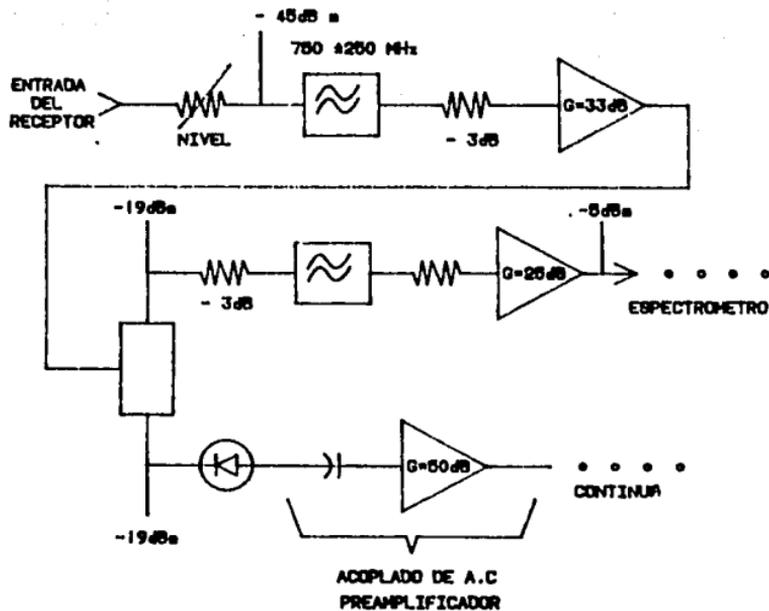


FIG. 4.3' Sección FI de un radiómetro.

compuestos en un sólo módulo.

En la salida obtenemos un nivel de voltaje el cual corresponde a la diferencia entre temperaturas T_k y T_{ref} . Dónde la temperatura de referencia es la del modulador aproximadamente 290 K.

Para asegurar la calibración del radiómetro hay que emplear una corneta estándar en guía de onda con una ganancia aproximada de 20 dB, con temperatura de ruido aproximadamente de 70K.

IV.7 CARACTERISTICAS DE LA ANTENA

La antena de un radiómetro constituye el primer eslabón de la cadena de recepción de las señales de una fuente de radio. Este elemento suele adoptar diferentes configuraciones todas encaminadas a lograr una máxima ganancia con el máximo rechazo de señales indeseables.

Si analizamos la estructura de una antena destinada a estos fines tenemos en el caso de una antena parabólica, el reflector que adopta la forma de un paraboloide de revolución, siendo su eje de simetría la perpendicular a su centro, que coincide con la dirección de máxima recepción.

En un punto especial de dicho eje se ubica el foco (fig. 4.3) que adoptará diversas configuraciones según la longitud de onda en la que opere. Si la frecuencia es relativamente baja (λ [cm]) el dipolo es alimentado por un cable coaxial, a través de una adaptación apropiada.

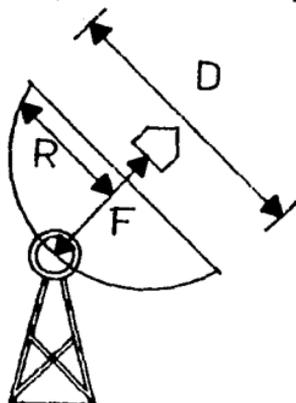


FIG. 4.4 Antena con reflector parabólico.

Cuando la longitud de onda es muy corta, se utilizan guías de onda. Las dimensiones de estas guías guardan relación con la longitud de onda de operación, razón por la cual se les reserva para las ondas milimétricas, ya que su tamaño sería excesivo para frecuencias más bajas; como contrapartida sus pérdidas son mucho menores que las de las líneas coaxiales.

En la antena parabólica la energía de la fuente incide sobre la superficie del reflector parabólico y se concentra en su foco, donde se intercepta por la antena (dipolo o cono de la guía de onda).

La distancia focal (REF 4) para esta antena se obtuvo de la fórmula:

$$f/D = 0.35 \quad (4.c)$$

Donde:

f.- Distancia focal.

D.- Diámetro del reflector parabólico.

Esta antena fué diseñada para trabajar en la banda de frecuencia de 4 - 6 GHz (Banda C). Con una longitud de onda de 7.6 cm. (REF 5)

IV.7.1 ANCHO DE HAZ

El ancho de haz es el campo de apertura máximo de una antena señalado por el ángulo obtenido cuando la potencia se encuentra a su valor medio.

El ancho de haz de la antena (REF 6), α esta dado por el límite de difracción:

$$\alpha = 58^\circ \frac{\lambda}{D} \quad (4.d)$$

Donde:

α .- Ancho de haz de potencia media.

λ .- Es la longitud de onda.

D.- Diámetro de la antena.

Para nuestro caso tenemos:

$$\lambda = 6 \text{ [cm]}$$

$$D = 1.6 \text{ [m]} = 160 \text{ [cm]}$$

Obteniendo el ancho de haz de potencia media:

$$\alpha = 2.755^\circ$$

Como comparación podemos definir que tanto el sol como la luna tienen un diámetro angular de aproximadamente 0.5° esto es $30'$. [Ver tabla 4.1]

Ahora obteniendo el tiempo en que la fuente tardará en transitar por el haz de la antena (manteniéndola inmóvil) se tiene:

$$t = \alpha (4) / \cos \delta \quad (4.e)$$

Donde:

δ .- Es la declinación de la fuente.

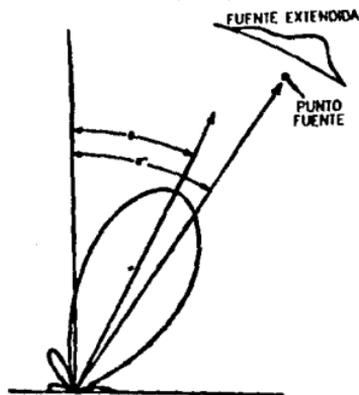


FIG. 4.5 Patrón de radiación de la antena

FUENTES COSMICAS

Considerando que de todas las fuentes cósmicas que existen estamos limitados a recibir las que son visibles desde México y las de mayor flujo a 5 GHz. Se tiene la siguiente relación en dónde se comparan diferentes parámetros de cada una de las fuentes. (REF 5 Y 6)

FUENTES COSMICAS DE MAYOR FLUJO A 5 GHz

FUENTE	NATURALEZA	α	Sv(Jy)	θ_{min}
Tauro A	Remanente Supernova	5h 32min	600	5
Centauro A	Galaxia	13 22	200	5
NGC6357	Región H II	17 22	450	20
Sagitario A	Centro via láctea	17 43	400	70
Casiopea A	Remanente Supernova	23 21	1000	4
Sol				
tranquilo	Estrella	- - -	10^8	30
Luna	Satélite natural	- - -	10^3	30

TABLA 4.1 . Parámetros de fuentes cósmicas

Donde:

- α .- Ascensión de la fuente
- h.- horas
- m.- minutos
- θ .- diámetro angular de la fuente
- Sv.- Densidad de flujo de la fuente

De esta tabla podemos concluir que el sol es aproximadamente 1000 veces más brillante que las otras fuentes excluyendo a la luna.

IV.7.2 TEMPERATURA

Calculando la temperatura de la antena que produciría una fuente

puntual (por puntual se entiende una fuente de diámetro angular mucho más pequeño que el ancho de haz de la antena).

Para el cálculo de este parámetro se consideró una fuente como el sol ya que es el más brillante, el cual tiene un flujo de potencia de 500 Jy [Ver tabla 4.1]

Si conocemos la densidad de flujo de la fuente tenemos:

$$T_A = \frac{S_V A_o}{2K} \quad [K] \quad [4.f]$$

Donde:

S_V .- Densidad de flujo de la fuente

A_o .- Area efectiva de la antena

T_A .- Temperatura de la antena.

Considerando la eficiencia de apertura de la antena la cual se calcula con la siguiente fórmula:

$$c_{ap} = \frac{A_o}{A_p} \quad [4.g]$$

Donde:

c_{ap} .- Eficiencia de apertura

A_p .- Area física de la antena.

Sustituyendo la ecuación [4.e] en [4.d] se tiene:

$$T_A = \frac{S_V c_{ap} A_p}{2K} \quad [4.h]$$

Sustituyendo valores en la ecuación se encuentra la temperatura de la antena.

$$T_A = 4.2 \quad [K]$$

IV.7.3 GANANCIA

La ganancia de una antena en una dirección determinada es la razón

entre la intensidad de radiación en esa dirección y la potencia medida radiada.

La ganancia de la antena la calculamos con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{8\pi K \Delta T_A}{S\lambda^2} \quad [4.1]$$

Considerando las características de la antena se tiene una ganancia de 0.0375 al utilizar como fuente puntual el sol.

IV.7.4 DIRECTIVIDAD

La directividad de una antena es una medida de la concentración de radiación en la dirección de máxima intensidad. Se calcula con la siguiente fórmula. [REF 15].

$$DIR = (9.9 (D / \lambda)^2) \quad [4. j]$$

En este caso tenemos una directividad de 0.01392.

Con estos parámetros queda definida la antena con reflector parabólico utilizada en el radiómetro.

IV.8 CARACTERISTICAS GENERALES

IV.8.1 ANCHO DE BANDA

Según la resolución de temperatura ΔT deseada se puede encontrar el ancho de banda del sistema [Ec. 3.j]. Por ejemplo si se desea alcanzar una diferencia de temperatura $\Delta T = 1$ [K] con una constante de tiempo $\tau = 1$ s Se tiene:

$$B = \Delta f = \frac{(KT_s)^2}{\Delta T^2 t} \quad [4. k]$$

Para el radiómetro de Dicke el valor de la constante es 2 (REF 3). La temperatura del sistema la calculamos con la ecuación 3.r Así:

$$\Delta f = \frac{k^2 (T_o (F-1))^2}{\Delta T^2 t} = 360 \text{ KHz} \quad [4.1]$$

El ancho de banda óptimo para una frecuencia de 70MHz es aproximadamente de 20-30 MHz para nuestro caso, tenemos una diferencia de temperatura de 0.133 [K]

$$\Delta T = \frac{2T_o (F-1)}{\sqrt{B \tau}} \quad [4.m]$$

De la ecuación anterior ΔT tendrá un valor de 133 [mK] considerando un ancho de banda de 20 MHz.

IV.8.2 GANANCIA

La ganancia se determina para alcanzar el detector mínimo con 900 [mW] a 300 [K] en la entrada del radiómetro.

La potencia de ruido esta entre 10^{-5} y 10^{-4} [W] obtenidos de la fórmula [3.u]. De la cual despejamos la ganancia.

Por lo tanto para un potencia de 10^{-5} tenemos una ganancia de 6×10^7 [W]. Y para una potencia de 10^{-4} tenemos una ganancia de 6×10^8 [W] en decibels tendremos que la ganancia esta entre 78 - 88 dB en total.

Los convertidores I y II tienen 45 [dB] y 20 [dB] respectivamente. El amplificador FI debe tener entonces 13 [dB] a 23 [dB].

CAPITULO V

EVALUACION DEL RADIOMETRO

V.1 ESPECIFICACIONES

Primero se consideran los parámetros principales para cada uno de los bloques:

DESCRIPCION	PARAMETROS NECESARIOS
Modulador	Pérdidas en circuito abierto < 1dB Pérdidas en circuito cerrado > 20dB
Convertidor	Figura de ruido 4 dB Amplificación de 40-55 dB
Convertidor II	Convertidor de banda 0.95-1.7GHz a la banda de 70 - 400 MHz.
Amplificador FI	Ganancia para asegurar la potencia de ruido al detector aproximadamente 0.01mW a 0.1 mW con $T = 300$ K a la entrada del convertidor I.
Ancho de banda	Se calcula según la resolución de temperatura deseada (si $\Delta T = 1$ [K] con $\tau = 1$ seg, $\Delta f = 360$ KHz) Ec. 4.c

V.2 EXPERIMENTO Y RESULTADOS

El experimento se realizó con un ángulo de incidencia aproximado de 87° con respecto a la tierra. Se realizaron pruebas variando la posición de la antena, para un tiempo aproximado de barrido de 20 segundos.

Se obtuvieron las gráficas que se muestran en la fig. 5.1 y 5.2 . Como se puede observar se obtienen dos gráficas diferentes ya que la radiación del sol varía de acuerdo a la hora en que se realice el experimento. Se escogió un horario cercano a las 12:00 PM debido a que las radiaciones del sol son más fáciles de detectar, y por las

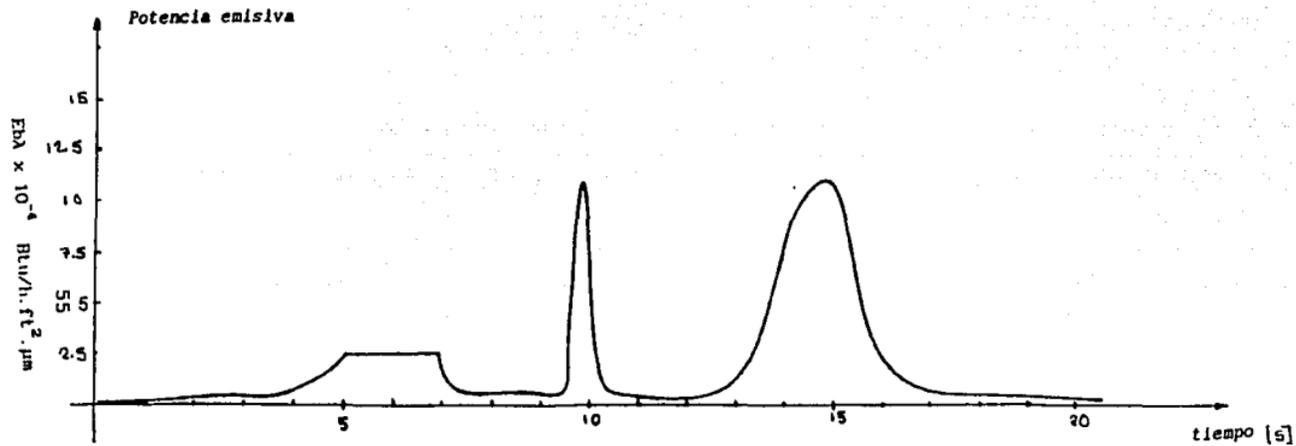


FIG. 5.1 Gráfica 1. Con un ángulo de incidencia de 87°

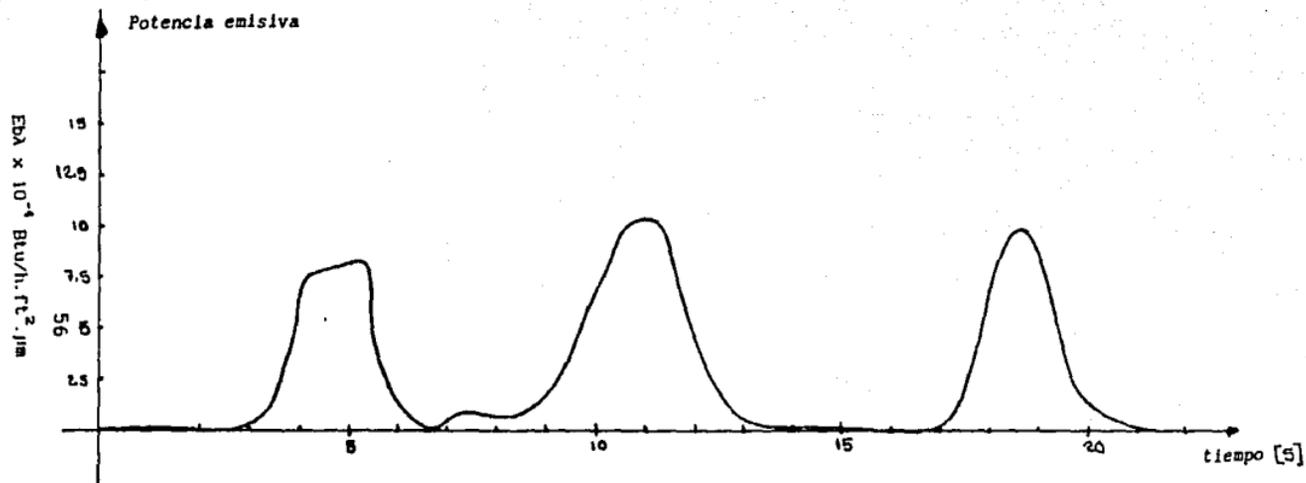


FIG. 5.2 Gráfica 2. Angulo de incidencia de 90°.

características de la antena de pequeño diámetro el radiómetro no resulta ser demasiado sensible.

Al realizar de esta forma las pruebas se obtuvo mayor resolución en las gráficas.

V.2 CONCLUSIONES

Las estimaciones de la temperatura del sol varían con la amplitud, pero por lo general llegan a los billones de Kelvins.

Las mediciones indican que el espectro de radiación del sol tiene una forma similar a la de un cuerpo negro, como se muestra en la figura.

Si se requiere mayor precisión en las medidas el diámetro de las antenas debe ser mayor. Si se acoplan 2 antenas de 1 [m] en fase, quedará constituido un pequeño interferómetro cuya resolución (en el plano que contiene a ambas antenas) es equivalente a la de una única antena de un diámetro igual a la distancia entre las dos parábolas.

Con una antena de 1.7m de diámetro se pueden captar señales de radiofuentes intensas como es el centro de nuestra galaxia a 30000 años luz de distancia y otras fuentes puntuales.

La mayor parte de la radiación esta entre $0.2\mu\text{m}$ y el pico ocurre cerca de $0.5\mu\text{m}$. Existe intensa absorción de la radiación solar en la atmósfera a causa de las concentraciones de dióxido de carbono y vapor de agua.

CAPITULO VI

APLICACIONES Y PERSPECTIVAS

VI.1 APLICACIONES

a) Radioastronomía

Las mediciones de la radiación solar son importantes por el número creciente de sus aplicaciones en calefacción y enfriamiento solar, y la necesidad de un conjunto de datos exactos sobre la irradiación solar a fin de predecir los rendimientos. [REF 9]

Los radiointerferómetros son utilizados para hacer medidas con buena resolución angular en la radioemisión del cielo. La resolución angular de las antenas por sí solas es insuficiente para muchos propósitos astronómicos. Las consideraciones prácticas limita la resolución a unas pocas decenas de arco. Por ejemplo el ancho de haz de una antena de 100 [m] a 7 [mm] de longitud de onda es aproximadamente 17 arcsec. [REF 11]

En el rango de óptica la difracción limita el tamaño de los telescopios. Un diámetro de aproximadamente 6 [m] es 0.025 arcsec, pero la resolución angular alcanzable de la tierra por técnicas convencionales es limitada a 1 arcsec, por la turbulencia en la tropósfera.

Para el progreso en la astronomía es particularmente importante que las medidas de las posiciones de las radio-fuentes sean con suficiente exactitud para permitir la identificación de objetos detectados en la óptica y otras partes del espectro electromagnético.

Es conveniente que sea capaz de comparar los parámetros tal como brillantez, polarización y espectro de frecuencia con similar o igual detalle angular en el dominio óptico como el de radio.

La medida precisa de las posiciones angulares de estrellas y otros objetos cósmicos es lo concerniente a astrometría. Este incluye un estudio del pequeño cambio de las posiciones celestes al introducir paralelaje por el movimiento orbital de la tierra, también como resultado de los movimientos intrínsecos de los objetos. Tales medidas son un paso

esencial en el establecimiento de la escala del universo.

Los radiointerferómetros actuales son capaces de medir temperaturas con ruido ΔT entre 1×10^{-3} [K] y 100 000 [K], con la constante de integración entre unos milisegundos y unas horas.

Es necesario estabilizar temperaturas de partes sensibles para asegurar la precisión de unos milikelvins.

El nivel de efecto de ruido del receptor debe ser pequeño. Por eso se emplean receptores con bajo ruido. Actualmente se emplean transistores de GaAs - MESFETS para 20 GHz. Y para las bandas de frecuencia entre 20 - 300 GHz se emplean nuevos tipos de transistores HEMTS. (REF 3)

b) Agricultura.

Los sistemas de radiómetro pueden detectar la radiación del suelo húmedo y estimar el contenido de agua; (REF 3) según la frecuencia de operación se puede reconocer también la profundidad de humedad en el suelo, desde unos centímetros hasta un metro, así como el contenido de agua. Los radiómetros miden la salinidad y algunos contaminantes en el agua.

c) Ecología.

Los radiómetros de microondas ofrecen varias posibilidades para reconocer según las líneas espectrales de emisión o de absorción, varios materiales peligrosos para la naturaleza. Por ejemplo: se detectan manchas de petróleo en el mar, impurezas y cambios de temperatura, la concentración de diferentes gases, el estado de la vegetación y otros parámetros importantes.

d) Medicina

Debido a que el radiómetro detecta temperaturas, permite medir temperaturas de tejido. La detección de temperaturas se emplea para emitir diagnósticos. Ej: Los tumores aislados tienen temperaturas elevadas y para realizar terapias.

En medicina se emplean dos métodos básicos: el método de contacto, que en lugar de la antena utiliza un aplicador el cual sirve para acoplar

la radiación de tejido al radiómetro. Y el método remoto el cual emplea ondas milimétricas para detectar temperaturas de la superficie del cuerpo. Con estos métodos se pueden detectar tumores cancerosos y las técnicas complementarias ayudan al diagnóstico y terapia del cáncer.

e) Industria

La capacidad de medir a cierta distancia diferentes niveles de temperatura es útil en la industria, ya que la radiometría activa, que emplea la potencia del ruido del generador, puede evaluar la atenuación o reflexión de materiales.

Este método no sufre de interferencias como otros métodos de microondas, tampoco es importante la posición del objeto entre el generador y el radiómetro.

f) Transporte

El sistema de radiómetro presenta una sensibilidad para detectar la presencia de hielo, por ejemplo en carreteras, en las vías marinas, etc. también es útil para reconocer peatones ya que su respuesta es diferente a la de los coches.

g) Comunicaciones

Para determinar la atenuación aditiva de atmósfera en las bandas de frecuencia destinadas para los enlaces de satélites, también se emplean radiómetros que detectan la emisión de precipitaciones en la atmósfera. Con estos se puede calcular la atenuación efectiva de la atmósfera.

h) Meteorología y Oceanografía

En el espectro de absorción de la atmósfera hay algunas líneas de H₂O, por ejemplo de 23 - 180 [GHz] los radiómetros pueden determinar el contenido de agua en las precipitaciones, en nubes y en la niebla.

Además procesando los datos contenidos por el radiómetro se pueden determinar la salinidad del agua en el mar, la dirección del viento y los contaminantes. (REF 7)

VI.2 PERSPECTIVAS

Las medidas astrométricas tienen también medios para examinar la teoría general de la relatividad y para establecer los parámetros dinámicos del sistema solar, los cuáles son importantes, por ejemplo, en navegación espacial.

De hecho éstas medidas son esenciales para establecer un sistema de posición de referencias. La masa inercial del universo provee la última referencia y medidas de radio de la distancia de los cuasars, además ofrece el mejor prospecto para el establecimiento de un sistema coordinado. [REF 11]

Las técnicas de radio dan una exactitud del orden de 10^{-3} arcsec para posiciones absolutas y 10^{-5} arcsec o menos para las posiciones relativas de objetos cercanos.

Las medidas ópticas de imágenes estelares como se ha visto a través de la atmósfera de la tierra, permiten determinar las posiciones con una precisión de 0.05 arcsec.

Sin embargo las mediciones futuras en lo relativo a las posiciones de un gran número de estrellas de un observatorio en la órbita de la tierra pueden ser utilizadas para realizar un sistema más preciso de las posiciones ópticas.

Como parte de los procesos de medida la astrometría incluye una determinación de la orientación de los instrumentos relativo a la referencia de los astros. Sin embargo, basados en las observaciones se puede dar una medida de la variación de los parámetros cinemáticos de la tierra.

Esto se refiere a los cambios irregulares de la dirección de los ejes de la tierra con respecto a la superficie. Estos cambios son referidos al movimiento polar y son atribuidos a los efectos gravitacionales del sol y de la luna en el eje ecuatorial de la tierra y los efectos dinámicos de la atmósfera de la tierra. Las mismas causas dan cambios en la velocidad angular de la tierra, lo que implica correcciones que deben ser aplicadas al sistema universal del tiempo.

En resumen, los cambios angulares en el movimiento y orientación de

la tierra, requiere de interferómetros precisos.

Las técnicas de interferometría han sido aplicadas en el desplazamiento de vehículos a la superficie de la luna y para la determinación de la posición de naves espaciales.

Al obtener resultados con la más alta resolución angular en el dominio del radio del espectro electromagnético resulta en parte la forma más fácil con la cual las señales de radiofrecuencia pueden ser procesadas electrónicamente. Esta capacidad permite procesar señales mucho más complejas en longitudes de onda más cortas.

La interferometría también puede ser aplicada para realizar experimentos acerca del origen del universo, como es el caso del grupo de radioastronomía de la UNAM, el cual utilizando la técnica de interferometría tendrán las bases necesarias para definir si la teoría siguiente es válida.

"Se cree que el sol en sus orígenes era una estructura rodeada de un disco de gas y polvo, después el núcleo de esta estructura se compactó hasta formar el sol, del disco a su alrededor se fueron paulatinamente condensando los planetas. Puesto que estos discos preceden a los planetas, se le llaman discos protoplanetarios". (REF 14)

Lo importante de los resultados de este experimento es que nos llevaría a concluir se la formación de los planetas es un fenómeno natural que se esta dando alrededor de otras estrellas, así como alguna vez se dió en nuestro sistema solar, y en él a la tierra.

La tecnología del futuro proveerá de la más alta resolución en el dominio óptico e infrarrojo en las observaciones de la atmósfera de la tierra.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Evans, C.W. McLeish. "RF Radiometer Handbook". Artech House, Inc. 1977. Massachusetts, USA.
- [2] Susumu, K. "The MV Radar for investigation of the Earth's Atmosphere". Antennas & Propagation Society. Vol 27 No. 3. Junio 1985.
- [3] Polivka, Jiri. "Principios de radiometría en microondas y aplicaciones". 6o. Seminario anual de metrología. 1989. México.
- [4] Fasterling, G., Escobar, M. "Diseño de un reflector parabólico para TV rural". TESIS. Director de tesis: M. en C. Amanda Gómez González 1989 Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [5] Rodríguez, L. F. "Características de un paraboloide de 11 [m] utilizado como radiotelescopio". Instituto de Astronomía, UNAM.
- [6] Krauss, John D. "Antennas". 2a. Edición. Ed. McGraw Hill
- [7] Skou, Niels. "Airborne Multifrequency Radiometry of Sea Ice". TESIS DOCTORAL. Technical University Denmark. Marzo 1980.
- [8] Hecht, Eugene., Zajac, Alfred. "Optica". 2a. Edición. Ed. Addison-Wesley Iberoamericana.
- [9] Holmann, Jack. "Métodos experimentales para ingenieros". 4a. Edición. McGraw Hill.
- [10] Skou, N. "Microwave radiometry of sea pollution monitoring". Transactions IEEE, GE-24 No.1. 1986.

- [11] Thompson, A. Richard., Moran, James. "Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy". 1a. Edición. John Wiley & Sons.

- [12] Rogers, G.L. "Noncoherent Optical Processing". 1a. Edición. John Wiley & Sons.

- [13] Perina, Jan. "Coherence of light". 1a. Edición. Ed. Van Nostrand Reinhold Company. Checoslovaquia.

- [14] Rodriguez, L. F. "Primeras imágenes de discos protoplanetarios". Instituto de Astronomía. UNAM. 1991.

- [15] Halliday, D., Resnick, R. "Física". 3a. Edición. Parte 2. Ed. CECSA

- [16] Tomasi, W. "Electronic Communications Systems". Ed. Prentice Hall
893 p.