

Informe Técnico CAY 1982 - 3

DETERMINACION DE PARAMETROS DE LA ANTENA
DEL CENTRO ASTRONOMICO DE YEBES (CAY)
IMPORTANTES PARA LA CALIBRACION DE LAS
OBSERVACIONES ESPECTRALES

Juan Peñalver Moreno

Alberto Barcia Cancio

El presente trabajo ha sido sufragado con cargo a los presupuestos del Proyecto de Investigación: "Estudio de la estructura y composición química de la Galaxia", con fondos dotados por la Comisión Asesora para la Investigación Científica y Técnica

1.- INTRODUCCION.

Con el presente trabajo se procede a la caracterización de la antena de 13.7 m del CAY mediante la determinación de parámetros de interés precisos para la calibración de las observaciones espectrales. Para ello se ha utilizado el nuevo receptor a 90 GHz recientemente instalado. Los pasos seguidos se exponen a continuación:

Seguidamente se ha determinado la distribución de potencias de entrada a la antena, para ello el diagrama de radiación se supone compuesto por cuatro contribuyentes básicos, a saber diagrama de difracción, diagrama de error, "spillover y scattering" anterior y "spillover y scattering" posterior; sus significados se comentan en el apartado 1.1. Conviene aclarar que esta distribución de potencias de entrada a la antena que continuamente se refiere, es para el caso de una radiación isotrópica, en el caso real, la radiofuente entrará prácticamente tan sólo por el diagrama de difracción, que ocupa una fracción de la potencia total captada por la antena cuando la radiación es isotrópica.

En el capítulo 2 se ha procedido a hallar la temperatura de ruido del receptor precisa para la conversión de las tensiones medidas en temperaturas.

En el capítulo 3 se calcula la potencia acoplada al cielo, debida a los tres primeros contribuyentes anteriores, y se expone el método para la determinación de la atenuación atmosférica.

En los capítulos 4 y 5 se utiliza el Sol como fuente intensa para la caracterización del diagrama de error debido a la pequeña amplitud de éste, así como fuente extensa para determinar la relación entre las potencias captadas por el diagrama de difracción y de error.

En el capítulo 6 se consideran conjuntamente los resultados obte-

nidos en los anteriores capítulos para determinar la fracción correspondiente a cada uno de los contribuyentes básicos, es decir η_{ad} , η_{de} , η_{ssa} y η_{ssp} debidas respectivamente al diagrama de difracción, diagrama de error, "spillover y scattering" anterior y "spillover y scattering" posterior.

En el capítulo 7 se consideran medidas realizadas con una fuente relativamente puntual, como es el caso de Júpiter, para determinar otros parámetros de interés en la caracterización de la antena tales como eficiencia de apertura, rugosidad superficial y directividad, así como la expresión del diagrama que engloba conjuntamente al de difracción y error.

Finalmente, en el capítulo 8 se resumen los resultados obtenidos anteriormente.

1.1- Distribución de potencias de entrada en la antena.

El diagrama de radiación de la antena capta la potencia incidente procedente de distintas regiones espaciales referidas al eje de dicho instrumento. Como ya se ha dicho en el apartado anterior, pueden reducirse a cuatro los contribuyentes del diagrama que permiten captar esa radiación incidente y se detallan a continuación:

- Contribución debida al diagrama de difracción. Este diagrama es producido al iluminar adecuadamente el reflector principal, se compone de un haz principal así como de lóbulos secundarios debidos al efecto de difracción. En la antena ideal, prácticamente toda la potencia captada lo es a través de este diagrama, en la realidad la superficie no es un paraboloide perfecto, la iluminación no es posible concentrarla sólo en la apertura y los efectos del radomo originan que gran parte de la potencia captada entre por otras vías diferentes a las del diagrama de difracción; se llamará eficiencia del diagrama de difracción η_{ad} a la fracción de potencia que entra a través de éste, interesa que sea lo mayor posible y a

su vez esté concentrada en el lóbulo principal.

- Contribución debida al diagrama de error. Es debida a que a la longitud de onda de trabajo, la rugosidad superficial es significativa como para producir desfases en la iluminación de apertura, cuyo efecto se traduce en la creación de un diagrama de amplitud mucho menor al de difracción y anchura mayor, así pues este diagrama es especialmente significativo al observar fuentes extensas como a menudo ocurre con líneas espectrales. Se denominará η_{de} a la eficiencia de dicho diagrama.
- Contribución debida a "spillover y scattering" anterior. Se llama así a la potencia proveniente del hemisferio anterior de la antena y que no pertenece al diagrama de difracción ni de error, aunque prácticamente está concentrada en las proximidades de éstos, por lo que se considera acoplada al cielo. Es producida por los efectos de "scattering y spillover" y la fracción captada, denominada eficiencia de "scattering y spillover" anterior, se designa como η_{ssa} .
- Contribución debida a "spillover y scattering" posterior. Similar a la anterior pero proveniente del hemisferio posterior de la antena y acoplada prácticamente al entorno próximo, su eficiencia se denomina η_{ssp} . Está claro que al bajar en elevación parte de η_{ssp} se desacopla del entorno y se acopla al cielo, al contrario que η_{ssa} , a pesar de lo cual este intercambio no es significativo hasta elevaciones bajas.

Está claro el interés en que η_{dd} sea lo mayor posible y en que η_{de} , η_{ssa} y η_{ssp} sean mínimas. Esto no siempre es posible y las tres últimas contribuciones son una realidad con la que hay que contar.

Aunque por el diagrama de radiación entran las cuatro contribuciones anteriormente expuestas, para fines prácticos se designará diagrama a la aportada por las dos primeras, es decir difracción y error y conjuntamente se designará eficiencia de diagrama η_d a

$$\eta_d = \eta_{dd} + \eta_{de} \quad (1.1)$$

similarmente se denominará coeficiente o eficiencia de acoplamiento al cielo η_1 a la contribución de las tres primeras

$$\eta_1 = \eta_d + \eta_{ssa} \quad (1.2)$$

la relación entre todas las eficiencias anteriormente citadas queda como a continuación se indica:

$$\underbrace{\underbrace{\eta_{dd} + \eta_{de}}_{\eta_d} + \eta_{ssa} + \eta_{ssp}}_{\eta_1} = 1 \quad (1.3)$$

y su determinación se expone en el presente trabajo.

2.- DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE RUIDO DEL RECEPTOR.

La necesidad de disponer de un factor de conversión para pasar de las tensiones medidas a temperaturas, exige la determinación de la temperatura de ruido del receptor T_{rec} por no disponerse todavía de un sistema de calibración absoluta.

Para poder realizar dicha medida se precisan dos señales de referencia cuyas potencias sean perfectamente conocidas. A frecuencias de milimétricas, dichas referencias suelen ser material absorbente a temperatura conocida que colocado delante de la bocina produce una radiación similar a la del cuerpo negro.

Para la primera referencia se mantuvo el absorbente a la temperatura ambiente, considerándose como carga caliente, produciendo una potencia detectada

$$P_h = k G B J(T_{rec} + T_h) \quad (2.1)$$

donde k es la constante de Boltzman, G la ganancia del receptor, B ancho de banda predetección y T_h la temperatura de referencia caliente a la que se encuentra el absorbente. $J(T)$ es la temperatura efectiva de radiación dada por

$$J(T) = \frac{\frac{hf}{k}}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1} \quad (2.2)$$

siendo h la constante de Plank y f la frecuencia de medida. En plan práctico, para utilizar la anterior fórmula, se suele tomar para $f = 100$ GHz

$$\frac{hf}{k} = 4.799 \quad (2.3)$$

haciendo la corrección adecuada para frecuencias próximas. Se puede utilizar la aproximación de Rayleigh-Jeans $J(T) \simeq T$ para $hf \ll kT$, o

lo que es lo mismo $f(\text{GHz}) \ll 20T(^{\circ}\text{K})$, como ese es el caso con las temperaturas manejadas en el presente capítulo, se usará dicha aproximación, por lo que (2.1) pasa a ser

$$P_h = k G B (T_{\text{rec}} + T_h) \quad (2.4)$$

Durante la determinación de la temperatura de receptor, T_h evolucionó de 292.8°K a 297.8°K teniéndose en cuenta el valor instantáneo para cada una de las medidas.

La segunda referencia de temperatura utilizada fué la del nitrógeno líquido, en cuyo caso

$$P_c = k G B (T_{\text{rec}} + T_c) \quad (2.5)$$

donde T_c vale

$$T_c = 77.36 + 0.011(P_b - 760) \quad (2.6)$$

siendo P_b la presión barométrica ambiental en milímetros de mercurio. Se midió directamente dicha temperatura del nitrógeno líquido y resultó de

$$T_c = 80.5 \pm 0.5 \text{ } ^{\circ}\text{K} \quad (2.7)$$

la diferencia con el valor teórico dado en (2.6) puede deberse a las impurezas contenidas en el nitrógeno o al error cometido con el medidor de temperatura, dicho medidor ha sido comparado a temperatura ambiente con otros termómetros y no se ha apreciado error en la lectura pero se desconoce si tal comportamiento se mantiene a bajas temperaturas por no haberse calibrado recientemente.

Tras medir P_h y P_c se obtiene el factor Y como

$$Y = \frac{P_h}{P_c} = \frac{T_{\text{rec}} + T_h}{T_{\text{rec}} + T_c} \quad (2.8)$$

de donde la temperatura de receptor, a determinar, vale

$$T_{\text{rec}} = \frac{T_h - Y T_c}{Y - 1} \quad (2.9)$$

Se realizaron distintas medidas de T_{rec} , según frecuencia, en las siguientes condiciones de funcionamiento del front-end:

$$\begin{array}{l} \text{Klystron} \left\{ \begin{array}{l} V_{\text{resonador}} = 2100 \text{ V} \\ I_{\text{resonador}} = 11 \text{ mA} \\ V_{\text{rejilla}} = 140 \text{ V} \end{array} \right. \\ \\ \text{Mezclador} \left\{ \begin{array}{l} I_{\text{pol. cont.}} = 10 \mu\text{A} \\ I_{\text{r.f.}} = 40 \mu\text{A} \end{array} \right. \end{array}$$

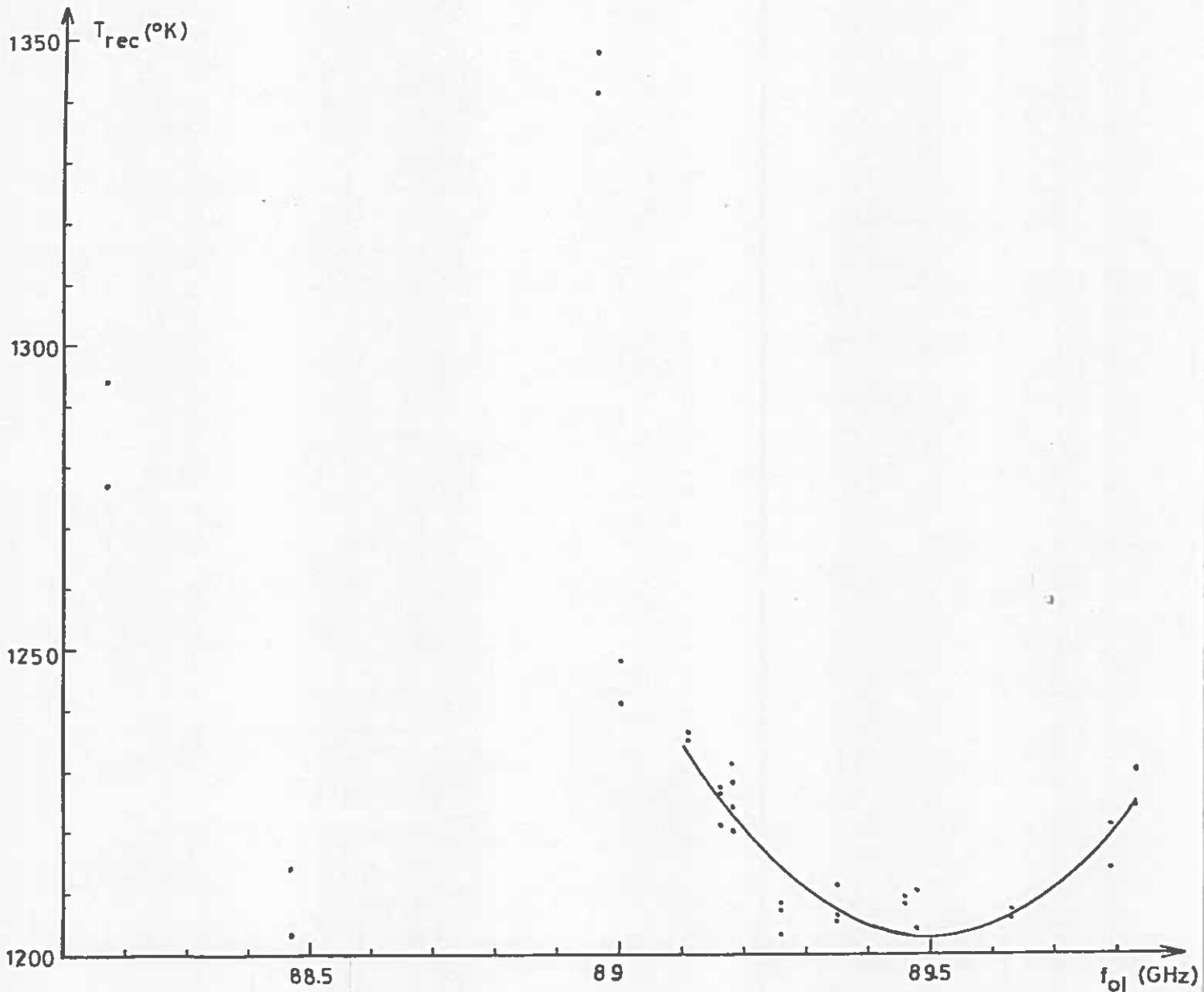


Figura 2.1

Temperatura de receptor según frecuencia de osc. local

La figura 2.1 muestra los valores de T_{rec} obtenidos. Se centraron las medidas en un pequeño margen de frecuencias del oscilador local (89.1GHz - 89.8GHz), pues se vió que en dicho margen se pasa por un mínimo de T_{rec} y éello es interesante para centrar en dicha frecuencia las observaciones de continuo. A esa zona se le aproximó una parábola resultando

$$T_{rec}(f) = af^2 + bf + c \quad (2.10)$$

siendo $a = 1.970 \times 10^{-2} (\text{°K} \cdot \text{GHz}^{-2})$

$b = -3.527 \times 10^{-4} (\text{°K} \cdot \text{GHz}^{-1})$

$c = 1.579 \times 10^6 (\text{°K})$

$f = \text{frecuencia del klystron}(\text{GHz})$

la σ de la aproximación (error cuadrático medio) vale 5°K para el margen cubierto.

Se midió también T_{rec} a diferentes corrientes de mezclador y frecuencia fija del klystron (89.48 GHz), los resultados se muestran en la figura 2.2; se aprecia un ligero descenso en la temperatura de receptor medida para corrientes de mezclador crecientes.

Cuando las medidas realizadas en los siguientes capítulos se hicieron con posterioridad a la presente calibración se utilizó una frecuencia de oscilador local de 89.5 GHz y una corriente de mezclador de $50 \mu\text{A}$ tomándose como temperatura de receptor 1204°K.

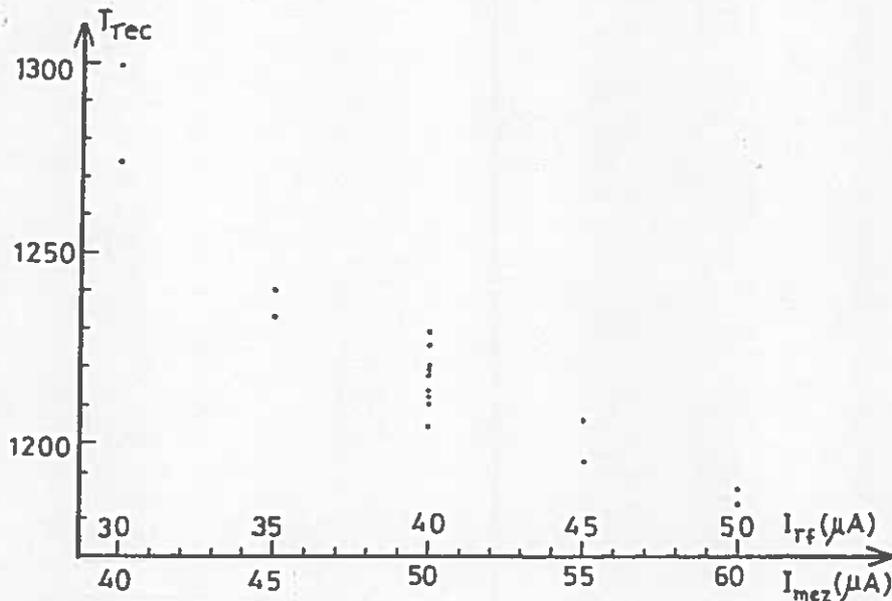


Figura 2.2

T_{rec} según corriente del mezclador

2.1- Error en la determinación de T_{rec}.

El error cometido en el cálculo de T_{rec} dependerá del error con que se determine cada una de las variables de que depende, a saber

(2.9) T_h, T_c e Y, por tanto

$$\begin{aligned} \delta T_{rec} &= \frac{1}{(Y-1)} \delta T_h - \frac{Y}{(Y-1)} \delta T_c - \frac{(T_h - T_c)}{(Y-1)^2} \delta Y = \\ &= K_h \delta T_h - K_c \delta T_c - K_y \delta Y \end{aligned} \quad (2.11)$$

y considerando los valores medidos:

$$\begin{aligned} K_h &= 5.93 \\ K_c &= 6.93 \\ K_y &= 7.61 \times 10^3 \end{aligned} \quad (2.12)$$

El error cometido en T_h o T_c es directamente estimable, no ocurre así con Y que precisa un poco más de elaboración.

La variable Y es el cociente entre la tensión medida con carga caliente y fría, es decir

$$Y = \frac{V_h}{V_c} \quad (2.13)$$

por lo que

$$\delta Y = \frac{1}{V_c} \delta V_h - \frac{V_h}{V_c^2} \delta V_c = K_{vh} \delta V_h - K_{vc} \delta V_c \quad (2.14)$$

con

$$\begin{aligned} K_{vh} &= 0.7273 \times 10^{-3} \\ K_{vc} &= 0.8500 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (2.15)$$

para δV_h y δV_c expresadas en mV, que es la resolución que se dispone con el medidor utilizado, por tanto

$$\begin{aligned} \delta T_{rec} &= K_h \delta T_h - K_c \delta T_c - K_y K_{vh} \delta V_h + K_y K_{vc} \delta V_c = \\ &= K_h \delta T_h - K_c \delta T_c - K_{yh} \delta V_h + K_{yc} \delta V_c \end{aligned} \quad (2.16)$$

siendo

$$K_{yh} = K_y K_{vh} = 5.54 \quad (2.17)$$

$$K_{yc} = K_y K_{vc} = 6.47$$

por tanto

$$\Delta T_{rec} = 5.93 \Delta T_h (^\circ K) - 6.93 \Delta T_c (^\circ K) - 5.54 \Delta V_h (mV) + 6.47 \Delta V_c (mV) \quad (2.18)$$

posibles offset que pudiesen existir en la determinación de V_h y V_c tienden a compensarse por la proximidad y signo contrario en el valor de K_{yh} y K_{yc} , con lo que se corregiría un posible error sistemático, quedando todavía el posible error debido a la resolución del voltímetro que es de 1 mV. El error cuadrático medio de 5°K encontrado en la aproximación realizada, tal como se muestra en la figura 2.1, está por tanto en concordancia con la resolución de que se dispondría para la realización de las lecturas, no descartándose un posible error sistemático cometido al medir T_c como se ha comentado anteriormente.

3.- MEDIDAS DE SKY-TIPPING.

3.1- Análisis del método.

La finalidad de las medidas de sky-tipping es doblemente la de poder determinar la eficiencia de acoplamiento de la antena al cielo η_1 así como la atenuación atmosférica τ . El principio para tales medidas se basa en que a longitudes de onda milimétricas la atmósfera terrestre es sólo parcialmente transparente.

3.1.1- Contribución atmosférica.

A la frecuencia de trabajo del radiotelescopio (próxima a 90 GHz) la atenuación atmosférica es debida a la absorción producida por el oxígeno, tanto resonante como no resonante, así como la debida al vapor de agua no resonante. A la vez que se produce dicha atenuación en las señales recibidas exteriores a la atmósfera terrestre, habrá una contribución de ruido debida a la propia atmósfera, y es la que se mide mediante sky-tipping. Para poder extraer posteriormente parámetros de interés, como es en primer lugar el η_1 , es preciso conocer la temperatura media de dicha capa atmosférica T_{atm} . Es usual expresar T_{atm} en función de la temperatura ambiente T_{amb} y, dado el gradiente de temperaturas negativo existente en la troposfera, $T_{atm} < T_{amb}$. Para poder evaluar T_{atm} se suele utilizar⁽¹⁾ el modelo consistente en considerar distintas capas atmosféricas debidas a las distintas sustancias absorbentes que a estas frecuencias posee la atmósfera, cada una de ellas a una temperatura diferente dependiente de la altura; según esto

$$T_{atm} = \int T_{amb} \quad (3.1)$$

donde $f=0.895$ para la capa de absorción de oxígeno resonante, $f=0.913$ para la absorción de oxígeno no resonante y $f=0.956$ para la absorción de vapor de agua no resonante. Así pues, el valor efectivo de la temperatura atmosférica se suele tomar típicamente como $0.94 T_{amb}$ a 90 GHz. El espesor de la capa atmosférica en la que se encuentran las anteriores subcapas se estima en 6 Km.

La atenuación producida por la atmósfera dependerá entonces de la cantidad de oxígeno y vapor de agua contenido en ella, si bien el oxígeno se mantiene en cantidades estables a lo largo del tiempo, no ocurre así con el vapor de agua que se incrementa con la temperatura y humedad relativa, o lo que es lo mismo humedad absoluta atmosférica, llegando incluso con la presencia de nubes a imposibilitar la realización de observaciones.

El espesor atmosférico observado es función de la elevación E con que apunta la antena, se suele expresar como las masas de aire A respecto a la dirección cenital, una buena aproximación es

$$A = \frac{1}{\text{sen}(E)} \quad (3.2)$$

válida para $A < 10$. Otra expresión más elaborada, que es la utilizada en el presente trabajo, viene dada por

$$A = \frac{\sqrt{(R \cos(90-E))^2 + h^2 + 2Rh} - R \cos(90-E)}{h} \quad (3.3)$$

donde R es el radio terrestre (para el Observatorio de Yebes 6370 Km), h el espesor cenital de la capa atmosférica ($h=6\text{Km}$) y E la elevación.

3.1.2- Modelo utilizado.

Las distintas contribuciones que existirán en la temperatura de antena cuando con ésta se apunta al cielo, en ausencia de fuentes, se pueden concretar en tres:

- Contribución debida a la atmósfera:

$$\eta_1 J(T_{\text{atm}}) (1-e^{-ZA}) \quad (3.4)$$

- Contribución debida a la radiación de fondo del universo:

$$\eta_1 J(T_{\text{bg}}) e^{-ZA} \quad (3.5)$$

con T_{bg} temperatura de "back-ground" o de dicha radiación de fondo e igual a 2.8°K.

- Contribución del "spillover y scattering" posterior:

$$\eta_{\text{ssp}} J(T_{\text{ssp}}) = (1-\eta_1) J(T_{\text{ssp}}) \quad (3.6)$$

la temperatura de "spillover y scattering" posterior T_{ssp} en principio debía ser igual a la temperatura ambiente, que es a la que se encuentran las superficies que producen esta contribución en la temperatura de antena. En la práctica $J(T_{\text{ssp}}) \neq J(T_{\text{amb}})$ por dos razones: en primer lugar las superficies que producen estas radiaciones, aún encontrándose a temperatura ambiente, no radian como cuerpos negros, además que parte de la radiación emitida es debida a reflexión; en segundo lugar se tiene la contribución del radomo cuyos efectos se pueden reducir a la expresión de este término $J(T_{\text{ssp}})$ y se analizarán en el siguiente apartado 3.1.3.

La temperatura de antena captada se puede expresar entonces como:

$$T_a = (1-\eta_1) J(T_{\text{ssp}}) + \eta_1 \left[J(T_{\text{atm}}) (1-e^{-ZA}) + J(T_{\text{bg}}) e^{-ZA} \right] \quad (3.7)$$

o también:

$$T_a = J(T_{\text{ssp}}) - \eta_1 \left[J(T_{\text{ssp}}) - J(T_{\text{atm}}) \right] - \eta_1 \left[J(T_{\text{atm}}) - J(T_{\text{bg}}) \right] e^{-ZA} \quad (3.8)$$

Como temperatura de referencia para la modulación Dicke⁽²⁾ se utiliza la del absorbente colocado en la rueda chopper T_{chop} , de temperatura equivalente de radiación $J(T_{\text{chop}})$, procesándose la diferencia entre ésta y la temperatura de antena. A esta diferencia se le llama temperatura de calibración T_{cal} por tener tal fin en las obser

vaciones astronómicas.

$$T_{\text{cal}} = J(T_{\text{chop}}) - T_a = J(T_{\text{chop}}) - J(T_{\text{ssp}}) + \eta_1 \left[J(T_{\text{ssp}}) - J(T_{\text{atm}}) \right] + \eta_1 \left[J(T_{\text{atm}}) - J(T_{\text{bg}}) \right] e^{-zA} = T_0 + T_1 e^{-zA} \quad (3.9)$$

donde:

$$T_0 = J(T_{\text{chop}}) - J(T_{\text{ssp}}) + \eta_1 \left[J(T_{\text{ssp}}) - J(T_{\text{atm}}) \right] \quad (3.10)$$

$$T_1 = \eta_1 \left[J(T_{\text{atm}}) - J(T_{\text{bg}}) \right] \quad (3.11)$$

En la realización de sky-tipping se obtienen distintas medidas de T_{cal} según elevación E o lo que es equivalente masas de aire A , a dichos valores se les ajusta por el método de mínimos cuadrados una expresión del tipo $V_0 + V_1 e^{-zA}$ donde V_0 , V_1 y z son los parámetros a determinar; en el apartado 3.6 viene el programa para realizar dicho ajuste.

En realidad V_0 y V_1 serán las tensiones medidas y no directamente identificables a las temperaturas T_0 y T_1 que interesa obtener, para ello será preciso conocer el factor de conversión de tensiones a temperaturas α ; ello es posible una vez conocida la temperatura de receptor tal y como se vió en el capítulo 2, pues sabiendo cual es la tensión que proporciona a la salida es posible obtener el factor de conversión α tal que $T_0 = \alpha V_0$ y $T_1 = \alpha V_1$.

El margen de elevaciones en el que se realizan las lecturas para el ajuste de sky-tipping tiene un límite inferior que no interesa rebasar por dos motivos: el primero y más importante es que a tales elevaciones bajas la capa atmosférica inferior se espesa de tal forma que anula los efectos de las capas superiores, como por otro lado esta capa se encuentra a una temperatura superior a la media atmosférica, ya no sería aplicable la relación $T_{\text{atm}} = 0.94 T_{\text{amb}}$, válida para elevaciones superiores; en segundo lugar se tiene que si bien la contribución por "spillover y scattering" anterior es una cantidad que se mantiene constante, es decir

$$\eta_{ssa} + \eta_{ssp} = \text{constante} \quad (3.12)$$

con la variación de elevación habrá contribución anterior que pasará a la posterior y viceversa, con la consiguiente modificación del η_1 que se pretende determinar, este intercambio es mayor a elevaciones bajas por haber una mayor proporción de "spillover y scattering" tanto anterior como posterior en las proximidades del eje de la antena. Por todo ello un límite inferior de elevación adecuado para la realización del ajuste es el de aproximadamente 5° ; a esta conclusión se llega tras análisis de las medidas realizadas considerando elevaciones más bajas y contrastándolas con la dispersión producida en los resultados obtenidos.

3.1.3- Efectos del radomó.

La protección de la antena mediante radomo produce una disminución en la señal captada del cielo; ello se traduce en una disminución de la eficiencia telescópica η_{1sr} que podría tener la antena sin la presencia del radomo, con lo que eficiencia telescópica final η_1 cumplirá:

$$\eta_1 < \eta_{1sr} \quad (3.13)$$

Un modelo que permita considerar el empeoramiento producido por el radomo sobre una antena sin tal protección sería el siguiente:

Supongamos una antena sin radomo, en tal caso la temperatura de antena T_{asr} será

$$T_{asr} = (1 - \eta_{1sr}) J(T'_{ssp}) + \eta_{1sr} \left[J(T_{atm})(1 - e^{-ZA}) + J(T_{bg})e^{-ZA} \right] \quad (3.14)$$

donde, como ya se ha dicho, η_{1sr} es la eficiencia telescópica o de acoplamiento al cielo sin radomo y T'_{ssp} la temperatura de spillover y scattering posterior en tales condiciones. La razón de usar T'_{ssp} es la de poder englobar en T_{ssp} de (3.7) los efectos del radomo.

Al colocar el radomo, a su superficie se le puede asimilar un

comportamiento respecto a la radiación incidente $J(T_{inc})$ tal como se indica en la figura 3.1 donde K_t es la proporción de potencia transmitida respecto a la incidente y es la contribución de los efectos de propagación K_p así como de reflexión K_r de la superficie del radomo y T_{rad} es la temperatura del radomo.

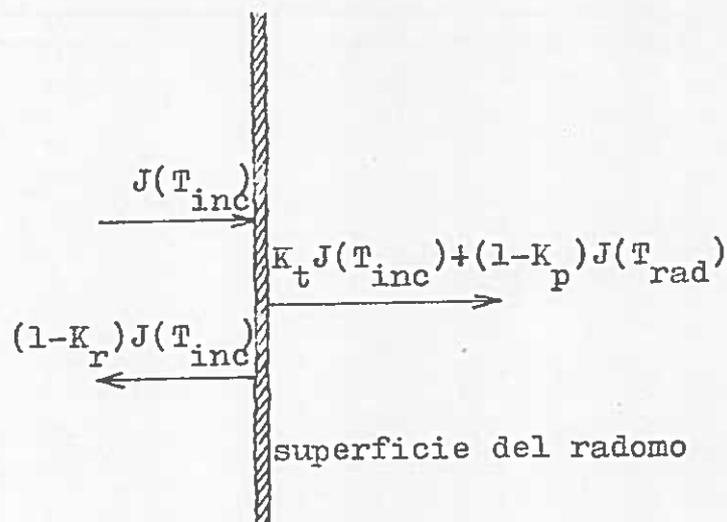


Figura 3.1

Introduciendo dichos efectos en (3.14), se tiene para la temperatura de antena T_a , ahora con radomo:

Comportamiento de la sup. del radomo

$$T_a = (1 - \eta_{lsr}) J(T'_{ssp}) + \eta_{lsr} \left\{ K_t \left[J(T_{atm}) (1 - e^{-\tau A}) + J(T_{bg}) e^{-\tau A} \right] + (1 - K_p) J(T_{rad}) + (1 - K_r) J(T'_{ssp}) \right\} \quad (3.15)$$

donde las distintas contribuciones son:

$$- \eta_{lsr} K_t \left[J(T_{atm}) (1 - e^{-\tau A}) + J(T_{bg}) e^{-\tau A} \right] \quad (3.16)$$

radiación proveniente del cielo, ahora K_t veces la anterior debido a los efectos del radomo.

$$- \eta_{lsr} (1 - K_p) J(T_{rad}) \quad (3.17)$$

contribución debida a la absorción del radomo.

$$- \eta_{lsr} (1 - K_r) J(T'_{ssp}) \quad (3.18)$$

contribución debida a la reflexión interna del radomo, siendo la temperatura vista la de spillover y scattering posterior.

$$- (1 - \eta_{lsr}) J(T'_{ssp}) \quad (3.19)$$

la contribución debida al scattering y spillover posterior, se supone no afectada, pues si bien el radomo produce los mismos efectos que a la radiación entrando por η_{lsr} , como lo que refleja y

atenúa se encuentran a una temperatura similar a la que ya veía, las modificaciones introducidas serán de segundo orden.

Reajustando los términos, la expresión (3.15) queda de la forma

$$T_a = (1 - \eta_{1sr} K_r) J(T'_{ssp}) + \eta_{1sr} (1 - K_p) J(T_{rad}) + \eta_{1sr} K_t \left[J(T_{atm}) (1 - e^{-\tau_A}) + J(T_{bg}) e^{-\tau_A} \right] \quad (3.20)$$

se puede suponer T'_{ssp} igual T_{rad} pues en principio deberán ser próximas a la temperatura ambiente, en tal caso (3.20) queda

$$T_a = \left[1 + \eta_{1sr} (1 - K_p - K_r) \right] J(T'_{ssp}) + \eta_{1sr} K_t \left[J(T_{atm}) (1 - e^{-\tau_A}) + J(T_{bg}) e^{-\tau_A} \right] \quad (3.21)$$

o de forma más usual, como se expresó en (3.7)

$$T_a = (1 - \eta_1) J(T_{ssp}) + \eta_1 \left[J(T_{atm}) (1 - e^{-\tau_A}) + J(T_{bg}) e^{-\tau_A} \right]$$

con

$$\eta_1 = \eta_{1sr} K_t \quad (3.22)$$

$$J(T_{ssp}) = \frac{1 + \eta_{1sr} (1 - K_p - K_r)}{1 - \eta_{1sr} K_t} J(T'_{ssp}) \quad (3.23)$$

De las dos expresiones anteriores se obtienen algunas conclusiones importantes respecto a la utilización del radomo:

1ª) Si bien T_0 de la expresión (3.9) es fácilmente obtenible tras el ajuste de sky-tipping, la reducción de dicho valor a parámetros de interés es prácticamente imposible por la cantidad de incógnitas que contribuyen a su expresión, a saber T'_{ssp} , K_p , K_r además de la posible incertidumbre en la determinación de otras como K_t , η_{1sr} y T_{atm} .

2ª) Más importante es el deterioro en el coeficiente de acoplamiento al cielo η_{1sr} , que evidentemente revertirá también en el empeoramiento del diagrama de antena. El factor de empeoramiento K_t o

pérdidas de transmisión del radomo es un valor que depende de la frecuencia de trabajo y que suministra el fabricante, la figura 3.2 es una gráfica de K_t en decibelios en función de la frecuencia. A 90 GHz (frecuencia en torno a la que se realizaron las medidas) $K_t=0.78$ (1.1dB). Es decir, el η_1 determinado para la antena es aproximadamente 0.78 veces el que tendría de no estar protegida por el radomo; visto de otra forma, η_1 con radomo será siempre inferior a 0.78 en estas frecuencias.

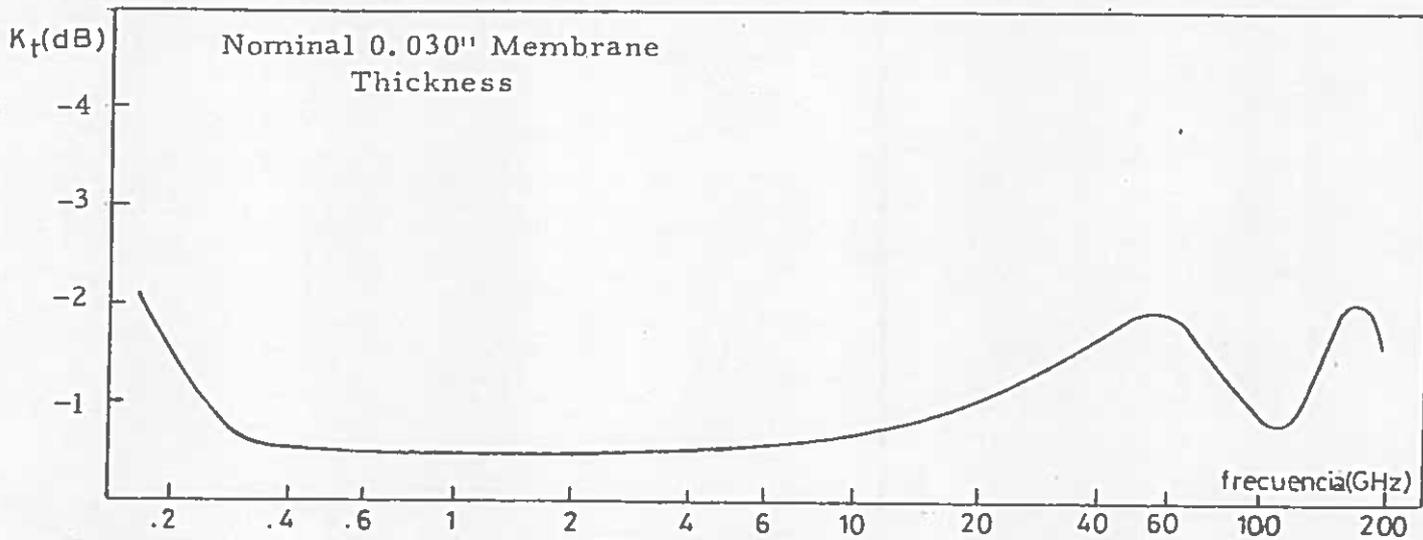


Figura 3.2

Coeficiente de transmisión del radomo K_t según frecuencia

3.2-Medidas realizadas.

Se realizaron 19 medidas de sky-tipping bajo diferentes condiciones, ello permitió ir depurando el modelo de análisis a la vez que contrastar los resultados, una crítica de ellos se hará posteriormente. La tabla 3.1 es un resumen de los distintos sky-tipping realizados, se eligió ST14 como el óptimo para la obtención de los resultados definitivos por las razones que más tarde se expondrán. Primeramente veamos con detalle como se realiza cada una de las medidas, para ello se cogerá como modelo ST14.

fecha	nombre	receptor	acimut	n. punt.	el. mín.	V_0	V_1	τ	V_1/V_0	ECMV (V)	ECMT (°K)	T_{amb} (°C)	hum. rel.	T_{chop}	altern.	$\tau_{1,2,3}$
25-2-82	ST1	A	220	19	2.5	0.72	8.27	.093	11.4	.116	2.65	8.0	80		4	
1-3-82	ST2	A	0	19	2.5	0.58	4.86	.151	8.3	.017	0.65	12.0	65		7	
1-3-82	ST3	A	45	19	2.5	0.63	5.62	.163	8.9	.075	2.57	12.0	60		3	
1-3-82	ST4	A	90	19	2.5	0.64	6.09	.150	9.5	.030	0.94	13.0	52		7	
1-3-82	ST5	A	135	19	2.5	0.73	6.30	.174	8.6	.122	3.74	14.0	50		5	
3-3-82	ST6	A	270	19	2.5	1.14	5.20	.104	4.6	.010	0.35	12.0	30		6	
3-3-82	ST7	A	170	19	2.5	0.85	5.56	.110	6.6	.024	0.81	11.5	30		4	
3-3-82	ST8	A	90	19	2.5	0.65	5.29	.094	8.1	.011	0.43	11.5	28		8	
3-3-82	ST9	A	0	19	2.5	1.03	4.93	.103	4.8	.040	1.53	11.0	29		3	
21-4-82	ST10	N	0	11	4.9	0.90	6.87	.084	7.6	.007	0.20	20.5	24		5	.086 .002
14-6-82	ST11	N	180	25	4.1	0.98	8.87	.214	9.0	.022	0.49	17.5	68		5	.228 .003
14-6-82	ST12	N	180	25	4.1	0.96	8.98	.212	9.4	.014	0.31	17.5	66		7	.223 .002
17-6-82	ST13	N	180	19	8.7	1.32	8.72	.207	6.6	.013	0.29	20.5	64	23.0	8	.201 .001
17-6-82	ST14	N	180	20	8.0	1.20	8.94	.193	7.4	.009	0.21	21.0	61	23.0	12	.194 .003
21-6-82	ST15	N	180	24	6.1	0.45	4.34	.234	9.6	.009	0.40	17.5	70	20.5	9	.240 .010
14-7-82	ST16	N	180	25	5.5	1.80	9.91	.181	5.5	.056	1.13	24.8	47	28.2	10	.180 .020
14-7-82	ST17	N	180	25	5.5	2.01	9.47	.174	4.7	.062	1.24	24.9	35	28.2	8	.170 .018
27-7-82	ST18	N	180	25	5.5	2.93	8.90	.143	3.0	.049	1.11	26.5	40	26.5	8	.105 .004
27-7-82	ST19	N	180	25	5.5	1.82	7.63	.117	4.2	.050	1.31	27.5	28	27.8	4	.103 .006

ECMV(V) : error cuadrático medio en voltajes (voltios)
 ECMT(°K) : error cuadrático medio en temperaturas (°K)
 receptor : A=receptor antiguo, N=receptor nuevo

Tabla 3.1

Resumen de los sky-tipping realizados

3.2.1- Realización de un sky-tipping (ST14).

Consiste en medir la temperatura de antena, o lo que es equivalente temperatura de calibración, a distintas elevaciones, para más tarde ajustarle una expresión del tipo (3.9). Primeramente el ajuste será del tipo

$$V_{\text{cal}} = V_0 + V_1 e^{-ZA} \quad (3.24)$$

que es el equivalente a (3.9) pero en voltajes. Para elegir las elevaciones a que realizar las medidas se tomó el juego de la tabla 3.2 en el que para pasar de masas de aire A ángulo de elevación E se utilizó la expresión (3.3). La tensión de calibración V_{cal} , también expresada en la tabla 3.2, se obtuvo mediante el programa TRACK1, mientras que el posicionado de la antena se realizó manualmente al no disponer de tal posibilidad dicho programa. Dos posibles versiones para la toma de datos con TRACK1 permiten leer directamente la diferencia, temperatura de chopper menos temperatura de antena, o bien independientemente cada uno de dichos valores. Con ST14 se utilizó la primera versión por no estar preparada todavía la segunda, esta última permite pasar más cómodamente a escala de temperaturas al ser la lectura de la tensión chopper proporcional a la temperatura del receptor más la del absorbente de la rueda.

Para pasar de tensiones a temperaturas en ST14 el proceso es el siguiente:

- se mide la tensión de salida del receptor (a la entrada del demodulador síncrono PAR) con la antena mirando al cenit ($E=90^\circ$ y rueda chopper parada), dicha tensión resultó ser 63.3 mV (medida antes y después del sky-tipping) siendo proporcional a la temperatura del receptor más la de antena. Es decir:

$$T_{\text{rec}} + T_a(E=90^\circ) = \alpha 63.3 \text{ mV} \quad (3.25)$$

donde α es el factor de proporcionalidad para pasar de mV a temperaturas.

A	E(°)	V _{cal}	T _{cal}	T _a	T _a (ajust.)
1	90.000	8.5754	188.87	104.97	105.10
1.25	53.110	8.2034	180.68	113.16	112.75
1.5	41.780	7.8975	173.94	119.90	120.03
1.75	34.811	7.5816	166.99	126.86	126.97
2	29.953	7.2849	160.45	133.39	133.59
2.25	26.333	6.9895	153.95	139.90	139.89
2.5	23.516	6.7260	148.14	145.70	145.90
2.75	21.255	6.4611	142.31	151.54	151.62
3	19.395	6.2003	136.56	157.28	157.07
3.33	17.390	5.9071	130.10	163.74	163.88
3.67	15.717	5.5908	123.14	170.71	170.46
4	14.373	5.3400	117.61	176.23	176.44
4.33	13.239	5.0877	112.06	181.79	182.05
4.67	12.242	4.8131	106.01	187.84	187.47
5	11.405	4.5960	101.23	192.62	192.40
5.33	10.673	4.4039	97.00	196.85	197.03
5.67	10.008	4.2045	92.60	201.24	201.50
6	9.434	4.0017	88.14	205.71	205.56
6.5	8.677	3.7483	82.56	211.29	211.25
7	8.026	3.5207	77.54	216.30	216.42
7.5	7.462	3.2921	72.51	221.34	ajuste realiza do hasta esta elevación
8	6.967	3.0926	68.12	225.73	
8.5	6.529	2.9030	63.94	229.91	
9	6.138	2.7469	60.50	233.34	
10	5.471	2.4639	58.23	235.61	
11.7	4.590	2.0665	45.52	248.33	
13.2	3.990	1.7710	39.01	254.84	
14.9	3.450	1.5089	33.23	260.61	
16.8	2.960	1.2917	28.45	265.40	

$$T_a \text{ (ajust.)} = 70.556 + 196.838(1 - e^{-.193A})$$

Tabla 3.2

Reducción de los valores medidos en el sky-tipping ST14

- las tensiones de salida medidas en el FAR se pueden pasar a mV conociendo la sensibilidad utilizada. Con ST14 la sensibilidad fué de 5 mV, por tanto

$$V_{\text{cal}}(\text{mV}) = \frac{V_{\text{cal}}}{10} \times 5 \times \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 1.1107 V_{\text{cal}} \quad (3.26)$$

- para pasar de dichas tensiones a temperaturas

$$T_{\text{cal}} = \alpha V_{\text{cal}}(\text{mV}) = 1.1107 \alpha V_{\text{cal}} \quad (3.27)$$

- finalmente, como

$$T_{\text{cal}}(E=90^\circ) = J(T_{\text{chop}}) - T_a(E=90^\circ) \quad (3.28)$$

y considerando (3.25)

$$T_{\text{rec}} + J(T_{\text{chop}}) - 1.1107 \alpha V_{\text{cal}}(E=90^\circ) = \alpha 63.3 \quad (3.29)$$

con ST14 se tenía $T_{\text{rec}} = 1150^\circ\text{K}$, $T_{\text{chop}} = 296^\circ\text{K}$ y $V_{\text{cal}}(E=90^\circ) = 8.5754$ con lo que α vale 19.83°K/mV .

De acuerdo a esto último V_{cal} puede pasarse primero a mV y posteriormente a temperaturas de calibración T_{cal} , igualmente para temperaturas de antena T_a una vez conocida T_{chop} , dichos resultados vienen expresados también en la tabla 3.2 para ST14.

Las tensiones medidas a las distintas elevaciones son las V_{cal} de la tabla 3.2, mediante el programa SKY TIPPING VOLTIOS se puede ajustar a estos valores la expresión

$$V_{\text{cal}} = 1.20119 + 8.93695 e^{-0.193 A} \quad (3.30)$$

reducible a temperaturas según (3.26) y (3.27) como

$$T_{\text{cal}} = T_0 + T_1 e^{-\tau A} = 26.46 + 196.84 e^{-0.193 A} \quad (3.31)$$

que conociendo la temperatura chopper se puede pasar a temperatura de antena según (3.9)

$$T_a = J(T_{\text{chop}}) - T_{\text{cal}} = 267.39 - 196.84 e^{-0.193 A} \quad (3.32)$$

tanto de (3.32) como (3.31) es posible extraer los parámetros de interés. Con ST14 el ajuste es bastante bueno, pues el error cuadrático medio entre los valores medidos y los ajustados es de 0.2°K .

3.2.2- Comentarios a los sky-tipping realizados.

Se realizaron en total 19 medidas de sky-tipping expuestas en orden cronológico en la tabla 3.1, las primeras 9 se hicieron utilizando el receptor antiguo mientras el resto fue con el nuevo, de mayor sensibilidad y estabilidad, dicha mejora puede apreciarse en el error cuadrático medio ECMT del ajuste que a veces es desmesuradamente elevado para el caso del receptor antiguo.

La elevación mínima a la que se llegaba en un principio era de 2.5° , tras análisis de ajustes en que se bajaba a distintas elevaciones, permitió concluir que dicha elevación era excesivamente baja. La tabla 3.3 muestra los resultados tras el ajuste de ST14 a distintas elevaciones, el mejor ajuste se ve que es para una elevación mínima de 8° , y por eso es el que se ha tomado definitivo, pero igualmente buenos son los ajustes acabados a elevaciones entre 10° y 6° pues Z y V_1 , parámetros de más interés a determinar, se mantienen bastante estables.

En los primeros sky-tipping realizados no era posible la conversión de voltajes a temperaturas por no conocerse con precisión la temperatura del receptor, por tanto el único parámetro absoluto que se podía obtener era el de la atenuación atmosférica Z . Con el nuevo receptor tal limitación está resuelta, se eligió ST14 como mejor sky-tipping por ser el que permitía mejor ajuste entre los valores medidos y el modelo establecido, a tal conclusión se llega analizando el error obtenido así como las alternancias en el signo del valor medido menos el valor aproximado, ver tabla 3.1.

El error en temperaturas se calculó a posteriori, tras conocer η_1 , como

$$ECMT = ECMV \frac{\eta_1 [J(T_{atm}) - J(T_{bg})]}{V_1} \quad (3.33)$$

resultando ser en ST14 de $0.2^\circ K$, lo que confirma la bondad del modelo teórico establecido. No ocurre así con los últimos sky-tipping, que por haberse realizado en condiciones estivales existía una atmósfera con bastante turbulencia, lo que falseaba las medidas y el consiguiente ajuste realizado, llevando a resultados bastante diferentes a los obtenidos con el considerado mejor sky-tipping.

La atenuación atmosférica Z tiene una gran dependencia con la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera, éllo puede apreciarse en la tabla 3.1; según los valores medidos esta atenuación variará, a 45° de elevación, entre 0.6 dB ($Z=0.09$) y 1.4 dB ($Z=0.23$). Este es un serio inconveniente en radioastronomía milimétrica, no sólo por la atenuación introducida por la atmósfera, mucho mayor que a frecuencias inferiores, sino también por las rápidas fluctuaciones tanto espaciales como temporales que se producen en dicha atmósfera y que perturban las medidas de las observaciones realizadas. Una forma de solventar este inconveniente sería mediante beam-switching, pues así la señal de referencia se ve afectada por las mismas variaciones atmosféricas, con lo que se consigue la corrección.

3.3- Coeficiente de acoplamiento al cielo η_1 .

Como ya se ha dicho η_1 permite conocer la fracción de potencia captada por la antena que se acopla al cielo, es decir, ve la temperatura atmosférica T_{atm} . Se ve a continuación como determinar η_1 así como el error cometido en dicho cálculo.

3.3.1- Determinación de η_1 .

Como ya se ha obtenido en ST14 (3.31), $T_1=196.84^\circ K$ y según (3.11)

$$T_1 = \eta_1 \left[J(T_{atm}) - J(T_{bg}) \right]$$

la temperatura ambiente T_{amb} cuando se realizó la medida era de 294°K y haciendo la suposición de $T_{atm} = 0.94T_{amb}$ se tiene $J(T_{atm}) = 274.21$, $T_{bg} = 2.8^\circ K$ y $J(T_{bg}) = 1.17$, así pues

$$\eta_1 = 0.721 \quad (3.34)$$

3.3.2- Errores en la determinación de η_1 .

Ya se ha visto en (3.11) que el coeficiente de acoplamiento al cielo se puede expresar

$$\eta_1 = \frac{T_1}{J(T_{atm}) - J(T_{bg})} = \frac{\alpha V_1}{J(T_{atm}) - J(T_{bg})} \quad (3.35)$$

donde α es el factor de conversión para pasar de las tensiones obtenidas mediante sky-tipping a temperaturas. El error en la determinación de η_1 será función del cometido en los parámetro de que depende, a saber temperatura atmosférica T_{atm} , tensión V_1 obtenida mediante sky-tipping y temperatura del receptor con que determinar α . Veamos la dependencia con cada uno de ellos:

- Dependencia con la temperatura atmosférica T_{atm}

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta_1}{\partial T_{atm}} &= \frac{\partial \eta_1}{\partial J(T_{atm})} \frac{\partial J(T_{atm})}{\partial T_{atm}} \approx \frac{\partial \eta_1}{\partial J(T_{atm})} = \\ &= \frac{-T_1}{[J(T_{atm}) - J(T_{bg})]^2} = -2.64 \times 10^{-3} \quad (3.36) \end{aligned}$$

se tiene entonces para

$$\Delta T_{atm} = -5^\circ \quad \rightarrow \quad \eta_1 = 0.734 \quad (T_{atm} = 0.923T_{amb})$$

$$\Delta T_{atm} = +5^\circ \quad \rightarrow \quad \eta_1 = 0.708 \quad (T_{atm} = 0.957T_{amb})$$

es decir, para una variación de T_{atm} de $\pm 5^\circ$ se tiene una variación en η_1 de 1.8%, correspondiendo a temperaturas atmosféricas de 0.923 ó 0.957 veces la temperatura ambiente, márgenes superiores a los que parece tener dicha temperatura atmosférica respecto la ambiente.

- Dependencia respecto a V_1

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial V_1} = \frac{\alpha}{J(T_{atm}) - J(T_{bg})} = \frac{19.83}{274.21 - 1.17} = 72.6 \times 10^{-3} \quad (3.37)$$

con V_1 expresado en mV, en el juego de ajustes hechos con ST14 a distintas elevaciones, ver tabla 3.3, se tiene un margen de variación de V_1 entre 8.937 (9.926 mV) y 9.005 (10.002 mV) para límites inferiores de elevación entre 12° y 6° , por tanto

$$\Delta \eta_1 = 72.6 \times 10^{-3} \Delta V_1 = 5.52 \times 10^{-3}$$

este margen correspondería a un error máximo del 0.8% en la determinación de η_1 . Esto viene a confirmar el que con buenas condiciones atmosféricas hay poca dispersión en el resultado obtenido cuando se acaba el sky-tipping entre 12° y 6° de elevación.

n.punt.	E_{min}	V_0	V_1	ζ	V_1/V_0	ECMV	ECMT
9	19.4	0.663	9.434	0.177	14.2	.00819	0.182
14	12.2	1.076	9.046	0.189	8.4	.00966	0.216
16	10.7	1.152	8.979	0.191	7.8	.00975	0.218
18	9.4	1.184	8.951	0.192	7.6	.00977	0.218
19	8.7	1.184	8.951	0.192	7.6	.00951	0.212
20	8.0	1.201	8.937	0.193	7.4	.00937	0.209
22	7.0	1.155	8.974	0.191	7.8	.00938	0.209
24	6.1	1.115	9.005	0.190	8.1	.00974	0.217
29	3.0	0.859	9.165	0.177	10.7	.02828	0.631

Tabla 3.3

Ajuste del sky-tipping ST14 según distintas elevaciones mínimas

- Dependencia respecto la temperatura de receptor T_{rec}

La temperatura de receptor es preciso conocerla para hacer la conversión de la tensión medida V_{cal} a temperatura de calibración T_{cal} por medio del factor α . De (3.29) se tiene

$$\alpha = \frac{T_{rec} + J(T_{chop})}{1.1107 V_{cal}(E=90^\circ) + 63.3} \quad (3.38)$$

con lo que

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta_1}{\partial T_{rec}} &= \frac{\partial \eta_1}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial T_{rec}} = \\ &= \frac{V_1 \text{ (mV)}}{[J(T_{atm}) - J(T_{bg})] [1.1107 V_{cal}(E=90^\circ) + 63.3]} = \\ &= 0.5 \times 10^{-3} \quad (3.39) \end{aligned}$$

y suponiendo una incertidumbre en la temperatura de receptor de $\pm 50^\circ K$ ($T_{rec} = 1150 \pm 50$), margen superior a la dispersión en las medidas de T_{rec} , se tendría $\eta_1 = 0.721 \pm 0.025$ ó un error máximo en su determinación del 3.5%.

Considerando los errores anteriormente comentados, se estima que el error máximo en la determinación de η_1 no debe exceder en un 5% al valor obtenido, con lo que $\eta_1 = 0.721 \pm 0.036$

3.4- Determinación de la atenuación atmosférica Z .

El otro parámetro de interés a obtener mediante la realización de un sky-tipping es la atenuación atmosférica cenital en nepers Z a partir de la cual determinar la atenuación atmosférica a cualquier elevación como ZA donde A son las masas de aire según (3.3). Este valor se obtiene directamente en el ajuste e independientemente a que

se consideren tensiones o temperaturas. En la tabla 3.1 se aprecia que el valor de Z es bastante fluctuante dependiendo de las condiciones atmosféricas (temperatura y humedad principalmente).

Otra forma alternativa para la determinación de Z suficientemente precisa es considerando un número mucho menor de medidas V_{cal} que las precisas para realizar un sky-tipping, tal y como se describe a continuación.

3.4.1- Determinación de Z por medio de una, dos y tres masas de aire.

Como se vió en (3.9) la temperatura de calibración T_{cal} se puede expresar:

$$T_{cal} = T_0 + T_1 e^{-\tau A}$$

y haciendo el cambio de variable $e^{-z} = X$

$$T_{cal} = T_0 + T_1 X^A \quad (3.40)$$

considerando dos masas de aire diferentes $A1$ y $A2$ se tendrá

$$\gamma_{1,2} = \frac{T_{cal}(A1)}{T_{cal}(A2)} = \frac{T_0 + T_1 X^{A1}}{T_0 + T_1 X^{A2}} \quad (3.41)$$

o lo que es lo mismo

$$X^{A2} - \frac{X^{A1}}{\gamma_{1,2}} + \frac{T_0}{T_1} \left(\frac{\gamma_{1,2}^{-1}}{\gamma_{1,2}} \right) = 0 \quad (3.42)$$

donde si $A1$ y $A2$ son enteros se tiene un polinomio de grado el mayor valor de los dos, eligiendo dichos enteros de valor no muy alto, por ejemplo hasta tres, el polinomio es fácilmente resoluble.

La siguiente cuestión es la determinación del cociente T_0/T_1 y que se habrá de estimar a priori cuando se desea hallar Z sin la realización de sky-tipping. Una primera opción y buscando una forma sim

ple de determinarlo sería considerar en la fórmula (3.9) la aproximación:

$$J(T) = T \quad (3.43)$$

$$T_{\text{chop}} = T_{\text{ssp}} = T_{\text{amb}}$$

con lo que

$$T_{\text{cal}} = \eta_1 (T_{\text{amb}} - T_{\text{atm}}) + \eta_1 (T_{\text{atm}} - T_{\text{bg}}) e^{-\zeta A} = T_0 + T_1 e^{-\zeta A} \quad (3.44)$$

de donde

$$\frac{T_0}{T_1} = \frac{T_{\text{amb}} - T_{\text{atm}}}{T_{\text{atm}} - T_{\text{bg}}} \approx \frac{T_{\text{amb}} - 0.94 T_{\text{amb}}}{0.94 T_{\text{amb}}} = 0.064 \quad (3.45)$$

aplicando tal relación a los sky-tipping realizados se ha observado que proporciona un valor de ζ en bastante discrepancia al obtenido directamente al realizar el sky-tipping.

Considerando la tabla 3.1 y puesto que el cociente T_0/T_1 es igual a V_0/V_1 , se puede trabajar con este último, se aprecia entonces que los márgenes de variación en V_0/V_1 van de 0.088 a 0.333 observándose una gran dispersión entre ellos, a la vez que en dicho margen no entra el valor obtenido según (3.45); por ello se han ensayado otros valores para la relación V_0/V_1 y se ha comprobado que una buena opción es tomar $V_0/V_1 = 0.1344$ que es el obtenido en ST14, además de ser un valor intermedio dentro de dicho margen.

De cada sky-tipping es posible obtener tres valores independientes para ζ según que A_1 y A_2 sean cualquier combinación de una, dos y tres masas de aire; en la tabla 3.1 se ha indicado como $\zeta_{1,2,3}$ la atenuación obtenida por este método. Se aprecia que el valor obtenido para $\zeta_{1,2,3}$ es una buena aproximación al valor de ζ obtenido mediante sky-tipping, la discrepancia existente viene como consecuencia de la gran dispersión de valores obtenidos en V_1/V_0 ; cuando dicho V_1/V_0 es mayor que 7.44, considerado valor típico y utilizado para la determinación de $\zeta_{1,2,3}$ en los demás sky-tipping, también el $\zeta_{1,2,3}$ es mayor

y al contrario para valores de V_1/V_0 menores a 7.44

La ventaja principal que presenta este método es la rapidez con que determinar la atenuación producida por la atmósfera en las observaciones a realizar.

3.5- Imprecisiones en la realización de sky-tipping.

Para la realización de un sky-tipping y consecuente obtención de parámetros como η_1 se ha supuesto un modelo atmosférico tal como el expresado en el apartado 3.1.1, la realidad es que el comportamiento y efectos de la atmósfera no son fácilmente predecibles, pues hay que concebirla como algo dinámico cuya evolución produce fluctuaciones de tipo local y que altera las medidas cuando se realizan a través de dichas zonas. En época estival se ha comprobado que dichas alteraciones atmosféricas son más significativas. Con sky-tipping realizados en dichas condiciones se han obtenido resultados para η_1 bastante diferentes al encontrado en el análisis hecho de ST14, la conclusión a la que se ha llegado es que como criterio para decidir si un sky-tipping va a ser bueno o no es el de observar el error que se ha cometido en su ajuste, pues cuanto menor sea éste, mayor es la concordancia entre realidad y modelo utilizado.

Por ejemplo, con ST19, realizado con el demodulador síncron PAR, se determinó un valor para T_1 de 157.68°K, con lo que se obtiene η_1 de 0.565, muy diferente al que se obtuvo en el apartado 3.3.1. El ajuste en este caso fué francamente malo pues el error cuadrático es seis veces mayor al tenido con ST14; por todo ésto, el resultado obtenido en tales casos no es en absoluto fiable.

3.6- Programa utilizado.

Para realizar el ajuste del sky-tipping se ha utilizado el programa SKY TIPPING VOLTIOS. Los datos a ajustar se han de introducir mediante DATA, a partir de la posición 511, mediante pares consecutivos de elevación y tensión medida, o bien de masas de aire y tensión, en cuyo caso hay que eliminar las sentencias 62 y 63 del programa.

La expresión ajustada es del tipo

$$V_0 + V_1 e^{-\zeta A} \quad (3.46)$$

siendo V_0 , V_1 y ζ los parámetros a determinar.

Si $V_i(A)$ es el valor de tensión medido para A masas de aire, se ensayan distintos V_0 tal que $\ln V_i(A) - V_0$ permita ser ajustado por el método de los mínimos cuadrados como $\ln V_1 - \zeta A$, que es la expresión de una recta; tras lo cual se calcula el error cuadrático medio en voltaje, ECMV, de las n elevaciones consideradas, según

$$ECMV = \sqrt{\sum_{i=1}^n [V_i(A) - V_0 - V_1 e^{-\zeta A}]^2} \quad (3.47)$$

Empezando con un valor de V_0 suficientemente bajo (sentencia 130), al irle incrementando irá disminuyendo el ECMV; cuando el ECMV comienza a crecer los incrementos de V_0 se hacen menores hasta que dicho parámetro se determina con la precisión adecuada (sentencia 230).

El programa permite hacer el ajuste eligiendo el punto inicial, final y salto de espaciamento de las medidas introducidas según DATA.

Los resultados que ofrece el programa son V_0 , V_1 , ζ y ECMV así como el error independiente con que finalmente queda ajustada cada lectura.

Para obtener las tensiones medidas a las distintas elevaciones de apuntado de la antena, con que crear el DATA del programa SKY TIPPING VOLTIOS, se ofrece la opción de utilizar los siguientes programas:

- PROGRAM ST. Sirve para extraer resultados obtenidos con el programa de seguimiento TRACK1 por medio del demodulador síncrono PAR. Los ciclos habrán de ser de 10 puntos que se promedian, ofreciendo un listado del valor asignado a cada ciclo (cada ciclo corresponde a una determinada elevación).
- PROGRAM DYCL. Sirve para representar de forma gráfica (y numérica si se desea) un determinado ciclo grabado mediante TRACK1 en su versión de lecturas independientes de disco y cielo.
- PROGRAM LECDL. Al igual que el anterior, es para utilizar con TRACK1 en su versión de lecturas en potencia total (de disco y cielo independientemente). Ofrece en su salida cuatro columnas en las que se especifica fase y ciclo a que corresponde cada fila, siendo las dos primeras el valor medio por ciclo que corresponde a las lecturas de cielo y disco, y las dos últimas lo mismo pero con los valores normalizados tal que la lectura del disco valga la unidad para que, si la temperatura del mismo fué estable, se corrijan las fluctuaciones de ganancia.

```

2211 10 PRINT "THE TITANIC SUNK"
2212 11 PRINT "ON APRIL 15, 1912"
2213 20 PRINT "THE TITANIC SUNK"
2214 30 PRINT " "
2215 40 FOR I=1 TO 1
2216 50 READ A1,A2,A3
2217 60 LET B11=(A1+A2+A3)/3
2218 62 LET B12=(A1+A2+A3)/3
2219 70 PRINT " "
2220 71 PRINT "THE TITANIC SUNK"
2221 72 PRINT " "
2222 73 LET J=(A1-A2)/A3+1
2223 80 LET A1=A2
2224 90 FOR I=1 TO 10 STEP 10
2225 100 LET A1=A1+1000
2226 110 LET A2=A1+10000
2227 120 PRINT " "
2228 130 LET A1=-2
2229 140 LET A2=11
2230 150 GOSUB 270
2231 160 LET A1=10
2232 170 LET A1=1
2233 180 LET A1=A1+1
2234 190 LET A2=A1
2235 200 GOSUB 270
2236 210 LET A2=10
2237 220 IF A1<=1 THEN GOTO 240
2238 230 IF A1<=1.0000000000000000 THEN GOTO 240
2239 240 LET A1=A1-1
2240 250 LET A2=11
2241 260 GOSUB 270
2242 270 LET A1=A2
2243 280 LET J=1/10
2244 290 GOTO 180
2245 300 LET A1=10
2246 310 LET A1=10
2247 320 GOTO 180
2248 330 LET A2=11
2249 340 GOSUB 270
2250 350 PRINT "A=";A1;" B=";A2;" C=";A3;" D=";A4
2251 360 FOR J=1 TO 10 STEP 10
2252 362 PRINT "LOG(A)=";LOG(A1);LOG(A2);LOG(A3);LOG(A4)
2253 364 LET J=J
2254 370 GOTO 310
2255 380 FOR J=1 TO 10 STEP 10
2256 390 LET LOGJ=LOG(A1+J)
2257 400 LET A1=A1+LOGJ
2258 410 LET B12=A1+LOGJ+LOGJ
2259 420 PRINT " "
2260 430 LET A1=A1+100
2261 440 LET A2=EXP((A1+A2+1)/2)
2262 450 LET C=(A1+1-1/10)/2
2263 460 LET C=A1
2264 470 FOR J=1 TO 10 STEP 10
2265 480 LET C=C+(A1+1-1/10)/2
2266 490 PRINT " "
2267 500 LET C=EXP(C/10)
2268 510 PRINT " "
2269 520 GOTO 310

```

```

0001 PROGRAM TEST
0002 DIMENSION I(10), J(10), K(10), L(10)
0003 CALL INIT
0004 WRITE(2,200)
0005 201 FORMAT('INITIAL VALUE OF C(1,1)=-')
0006 C(1,1)=17777
0007 IF=1
0008 DO I=1,10,10
0009 IF=1
0010 CALL SUB(C(I),J,I,K)
0011 C(I)=1
0012 DO I=1,10
0013 101 C(I)=C(I)+I**2
0014 C(I)=C(I)/10
0015 102 C(I)=C(I)
0016 PRINT(C(I),I**2)(I=1,10,10)
0017 202 FORMAT(5F10.0)
0018 PAUSE
0019 END
0020 END

```

```

0001 PROGRAM TEST
0002 DIMENSION I(10), J(10), K(10), L(10)
0003 201 CALL PAGE(0)
0004 CALL INIT
0005 WRITE(2,200)
0006 202 FORMAT('10 Y IF A DEER: -')
0007 READ(1,*) I, J
0008 CALL SUB(C(I),J,I,K)
0009 IF=I**2
0010 CALL SUB(C(I),J,I,K)
0011 CALL SUB(C(I),J,I,K)
0012 CALL PLT(C(I),J,I,K)
0013 WRITE(2,201)
0014 201 FORMAT('ELECTRIC REPRESENTATION OF INITIAL C(1,1)=10, I=10: -')
0015 READ(1,*) I
0016 I=C(I)*I, C(I)*I
0017 201 CALL PAGE(0)
0018 WRITE(2,202)
0019 202 FORMAT('ELECTRIC DEL I(10): -')
0020 WRITE(2,203)(C(I),I=1,10)
0021 203 FORMAT(10F7.4)
0022 WRITE(2,204)
0023 204 FORMAT(// 'ELECTRIC DEL C(10): -')
0024 WRITE(2,205)(C(I),I=1,10)
0025 205 FORMAT(10F7.4)
0026 CALL PAGE(1)
0027 206 IF(C(15))GOTO 202
0028 206 CALL CHR(15)
0029 PAUSE
0030 STOP
0031 END
0032 END

```

```

0021 PROGRAM LECTO
0022 DIMENSION DAT(15), BUF(1200), BUFC(120)
0023 CALL INIT
0024 WRITE(2,200)
0025 200 FORMAT('101. DE PASOS A LEER, CICLOS Y PUNTOS POR CICLO: ')
0026 READ(1,*) JPL, JCS, JPC
0027 DO I=1, JPL
0028 WRITE(2,2001)
0029 2001 FORMAT(//"PASO"15)
0030 DO J=1, JCS
0031 CALL DEC(J,I, DAT)
0032 CALL PROC(BUFL, JPC, BUFL)
0033 CALL PROC(BUFC, JPC, BUFC)
0034 DO K=1, JPC
0035 100 BUFL(K)=BUFC(K)/BUFL(K)
0036 BUFL=1.
0037 CALL PROC(BUFC, JPC, BUFC)
0038 101 WRITE(2,2010), BUFL, BUFL, BUFL, BUFL
0039 2010 FORMAT("CICLO"13": "AFIC.5)
0040 102 CONTINUE
0041 IF(15*JPL)GOTO 0042
0042 301 CALL CP(15)
0043 PAUSE
0044 STOP
0045 END
0046 SUBROUTINE PROC(I, JPC, IPR)
0047 DIMENSION A(I)
0048 IPR=0.
0049 DO I=1, IPR
0050 100 IPR=IPR+A(I)
0051 IPR=IPR/2.0*DAT(IPR)
0052 RETURN
0053 END
0054 END

```

4.- DETERMINACION DEL DIAGRAMA DE ERROR.

4.1- Significado del diagrama de error.

Todos los reflectores de las antenas radioastronómicas tienen imperfecciones en su superficie que condicionan el máximo aprovechamiento a conseguir con dichas antenas. En un reflector parabólico siempre habrá un error entre su superficie y el paraboloide perfecto que se pretende conseguir. Los efectos que producen dichas imperfecciones son los de una degradación del haz principal del diagrama de difracción, a la vez que aparece un nuevo haz de anchura función del radio de correlación en las imperfecciones de la superficie y amplitud dependiente del error con que se ajusta la superficie a un paraboloide perfecto, típicamente se pretende que dicho error sea del orden de $\lambda/16$ o menor, donde λ es la longitud de onda con que se trabaja.

A longitudes de onda milimétrica, mantener esa precisión de $\lambda/16$ en la superficie es mucho más difícil por el pequeño error que eso supone; por ejemplo, con $\lambda=3\text{mm}$ la precisión debería ser de 0.19mm lo que significa una alta relación entre diámetro y precisión de superficie para las antenas que últimamente se vienen usando en estas frecuencias.

Por no poderse siempre conseguir la precisión requerida, de acuerdo a lo expuesto anteriormente, el diagrama de error pasa a tener especial relevancia y es preciso su determinación para tenerlo en consideración en observaciones espectrales.

4.2- Fundamentos para su determinación.

La proporción de potencia capaz de entrar por el diagrama de error, aunque suele ser considerable, tiene la dificultad en su deter

minación que, por acoplarse a una zona extensa, la amplitud de dicho diagrama es bastante pequeña, a diferencia con el diagrama de difracción en que la ganancia es alta y el acoplamiento se produce a una zona pequeña, por ésto para la determinación del diagrama de error es preciso usar una radiofuente intensa que produzca señal detectable al recorrer dicho diagrama, a pesar de la pequeña amplitud de éste. Por todo ésto se utilizó el Sol en la determinación del diagrama de error ya que es la radiofuente más intensa utilizable por las antenas de milimétricas con grandes dimensiones.

El procedimiento es el siguiente, se hacen barridos centrados en el Sol de suficiente amplitud como para recorrer el diagrama de error completamente, seguidamente se elimina la zona central del barrido, que corresponde a la contribución del diagrama de difracción en su convolución con la fuente (en este caso el Sol); con las alas laterales que quedan se ajusta una gaussiana que corresponderá a la convolución del diagrama de error con el Sol, de los parámetros de dicha gaussiana y tras deconvolucionar se obtiene una nueva gaussiana correspondiente al diagrama de error de la antena. Se ha supuesto de partida que el diagrama de error de la antena tiene la forma de una gaussiana, es decir, obedece a una expresión del tipo

$$f_e(\theta) = A_e \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\theta}{\theta_e} \right)^2 \right] \quad (4.1)$$

donde $f_e(\theta)$ es la amplitud del diagrama de error según el ángulo respecto al máximo, A_e es la amplitud máxima y θ_e la anchura del diagrama a potencia mitad. Si la suposición de forma gaussiana para el diagrama de error es adecuada o no se decidirá a posteriori según el ajuste obtenido sea bueno o no.

En principio lo que se obtendrá no será la función de error $f_e(\theta)$ directamente, sino la convolución de ésta con una función tipo disco como es el Sol⁽³⁾ y que se llamará función de error convolucionada $f_{ec}(\theta)$ tal que

$$f_{ec}(\theta) = f_e(\theta) * S(\theta) \quad (4.2)$$

donde * significa producto de convolución, $S(\theta)$ es una función tipo disco tal que

$$S(\theta) = \begin{cases} 1, & \forall \theta \leq \theta_s/2 \\ 0, & \forall \theta > \theta_s/2 \end{cases} \quad (4.3)$$

y

$$f_{ec}(\theta) \simeq A_{ec} \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\theta}{\theta_{ec}} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

para $\theta_s < \theta_e$ como es el caso del Sol.

4.3- Medidas realizadas.

Se hicieron barridos centrados en el Sol y con una extensión total de 5° , se pretende así tener suficiente línea de base para el ajuste de la gaussiana, ver figura 4.1; se elimina seguidamente una franja central en el barrido, que es la que corresponde a la contribución del diagrama de difracción en su convolución con el Sol, y con las alas laterales que quedan se ajusta la gaussiana de la que se determina el diagrama de error.

Las figuras 4.2 a 4.8 muestran gráficamente como quedaría dicho ajuste según la anchura de la franja central eliminada, a su vez en la tabla 4.1 se muestran las condiciones del barrido y resultados según dicha anchura.

A la vista de las anteriores figuras y tabla, se estima que la anchura de la franja eliminada no debe ser inferior a $55'$ (minutos de arco), para tener la certeza de haber suprimido los efectos del diagrama de difracción, y tampoco superior a $75'$ pues se tiene poca información para hacer un buen ajuste de dicha gaussiana.

Se eligió una anchura de $60'$ como la óptima para la franja a eliminar y se repitieron las medidas realizando los barridos no sólo en

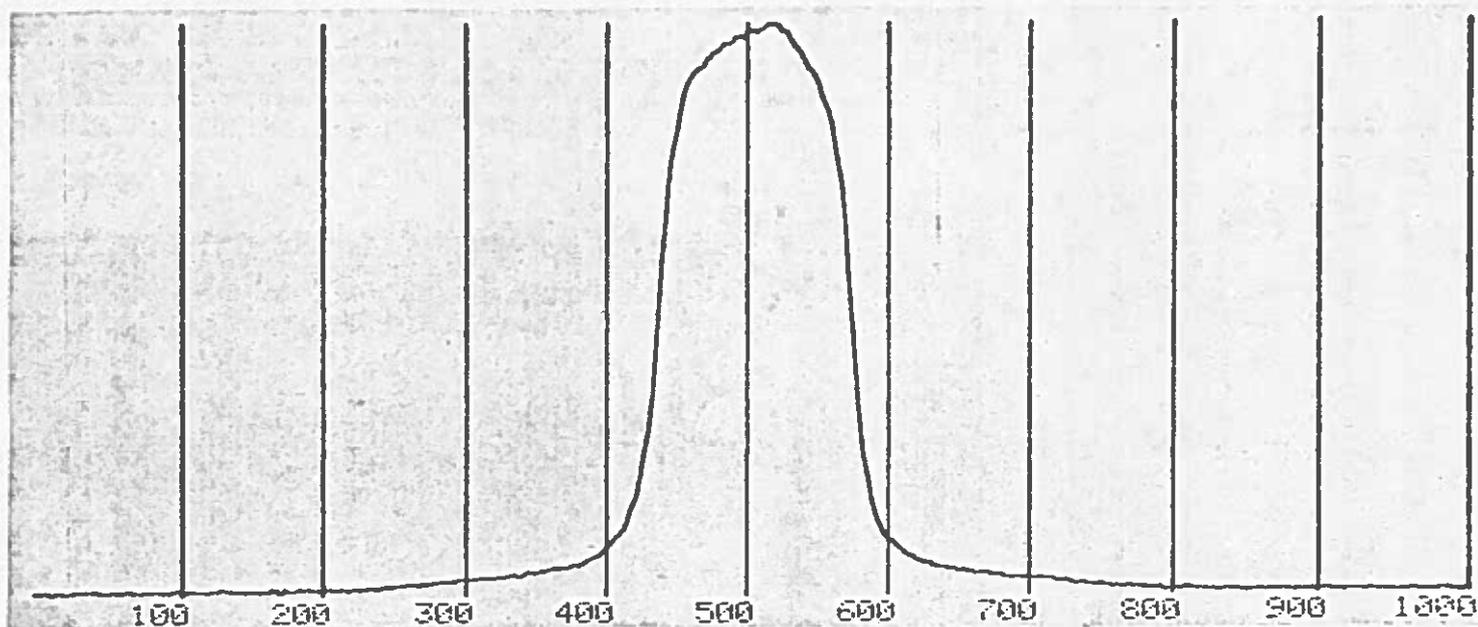


Figura 4.1

Barrido del Sol para determinación del diagrama de error

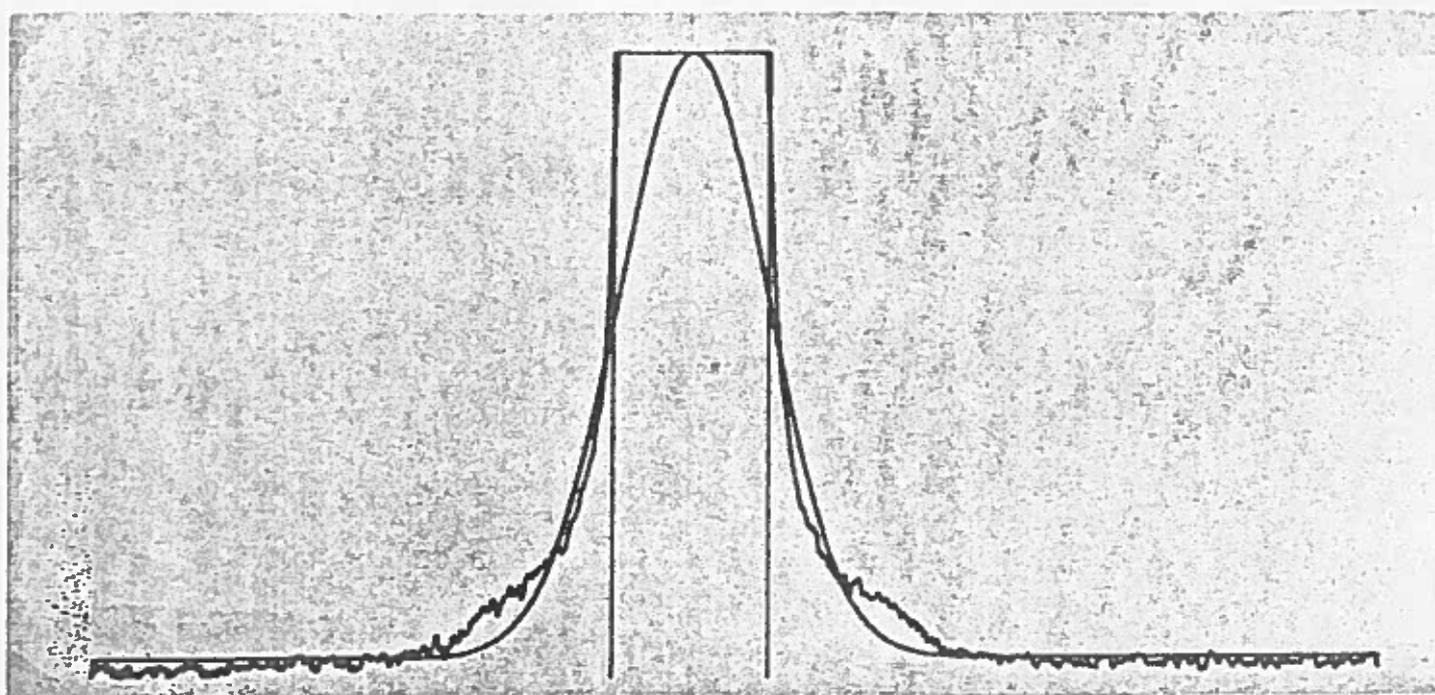


Figura 4.2

Ajuste del diagrama de error eliminando 40 minutos de arco

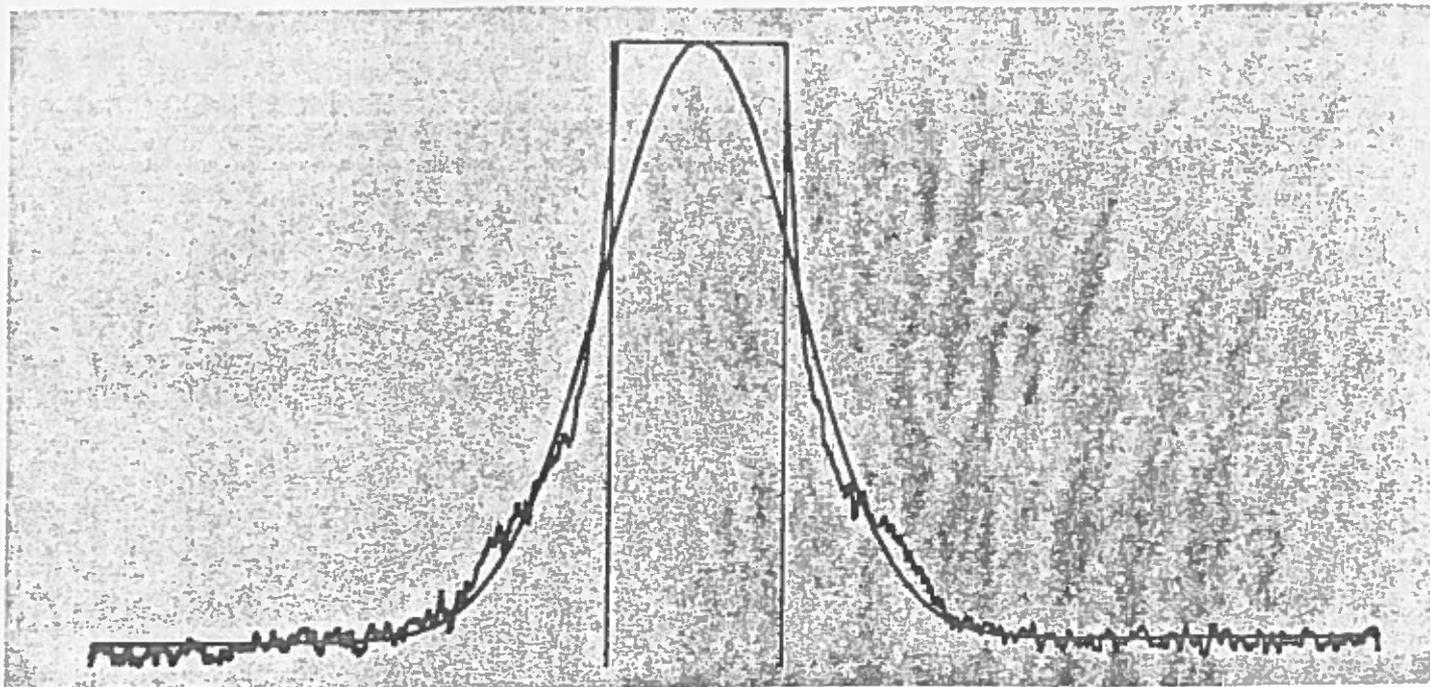


Figura 4.3

Ajuste del diagrama de error eliminando 45 minutos de arco

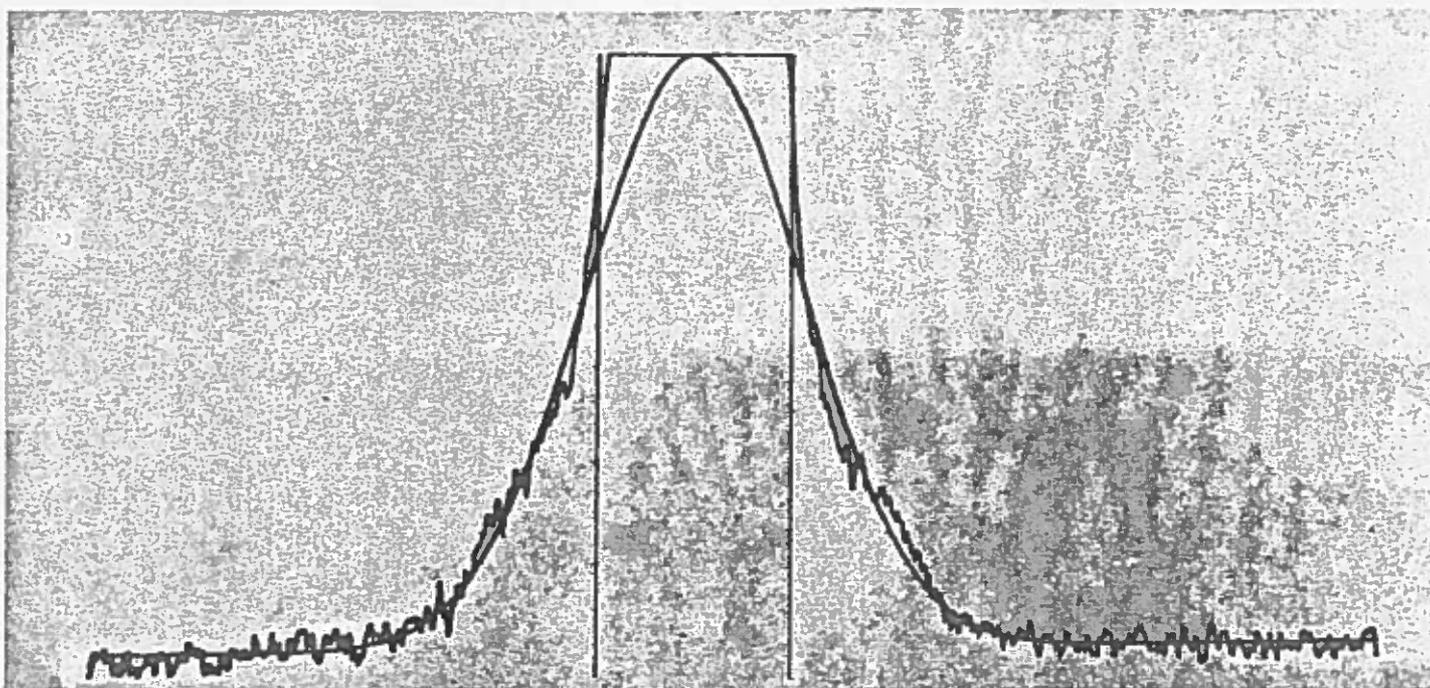


Figura 4.4

Ajuste del diagrama de error eliminando 50 minutos de arco

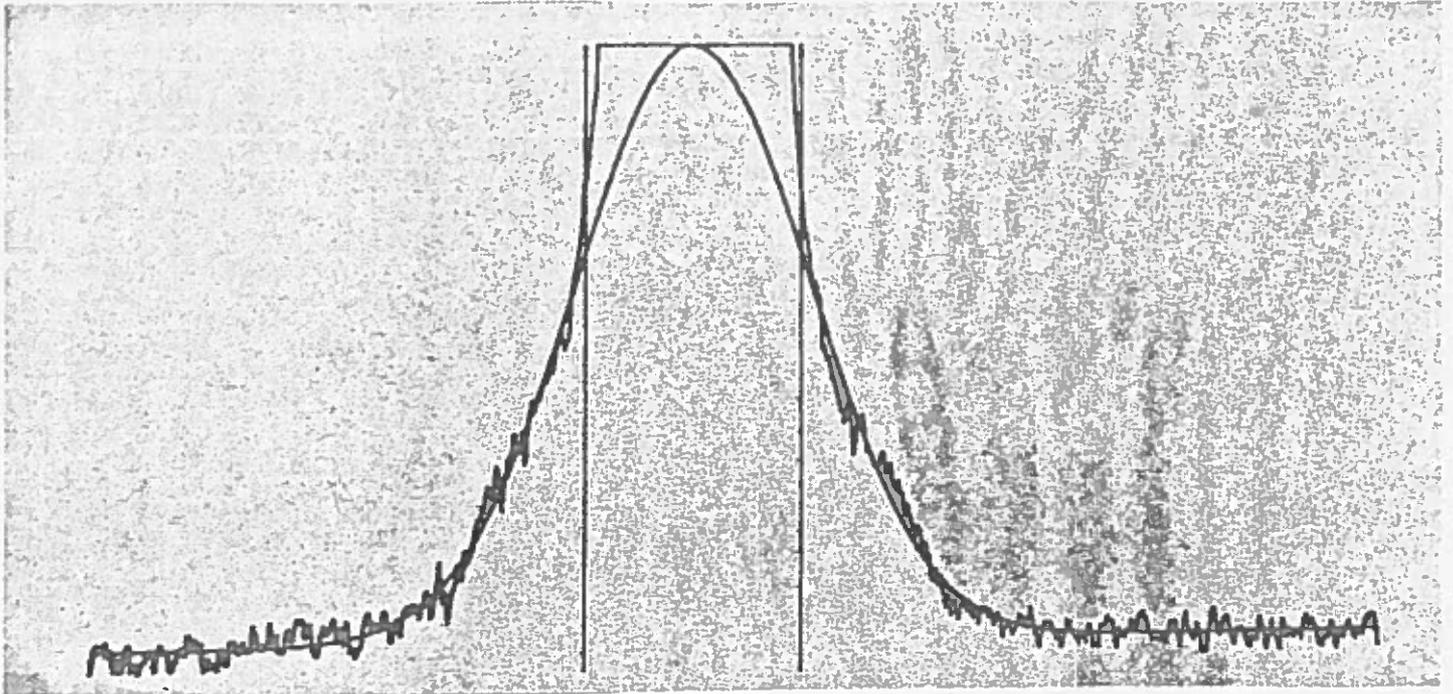


Figura 4.5

Ajuste del diagrama de error eliminando 55 minutos de arco

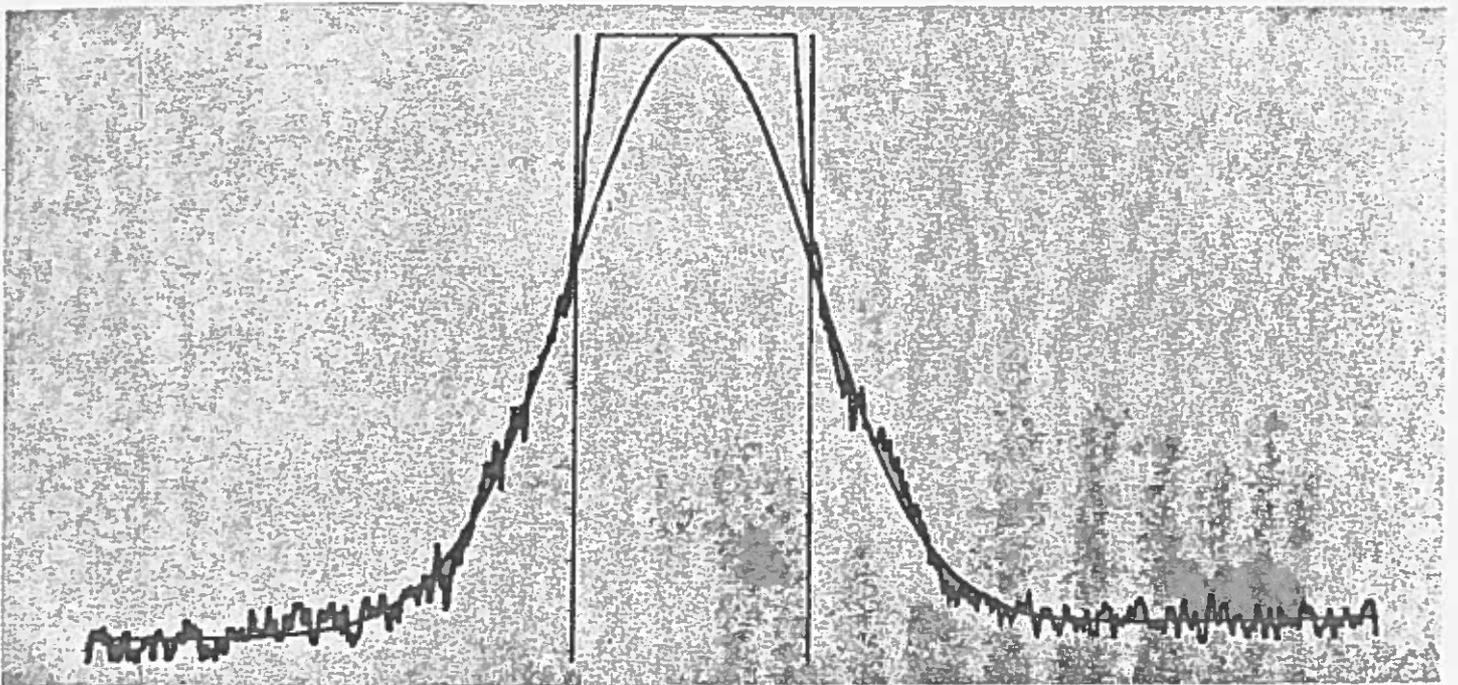


Figura 4.6

Ajuste del diagrama de error eliminando 60 minutos de arco

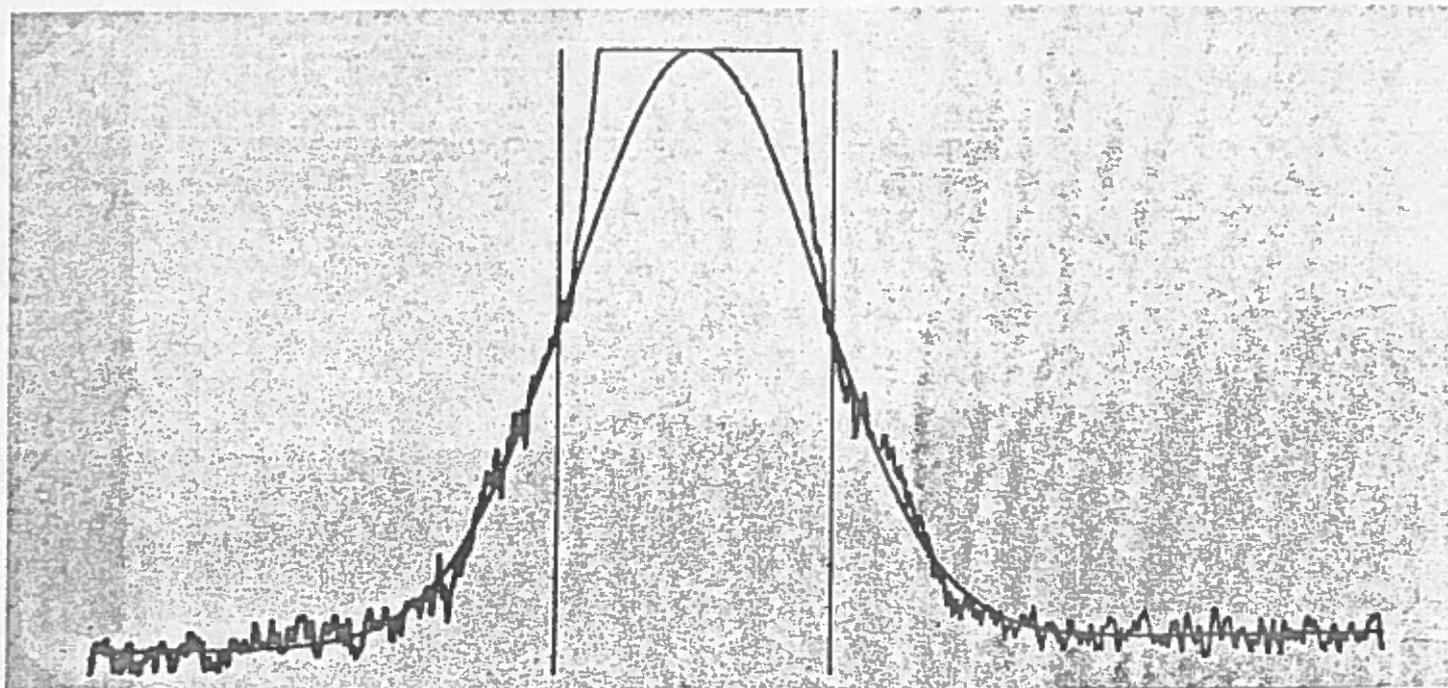


Figura 4.7

Ajuste del diagrama de error eliminando 70 minutos de arco

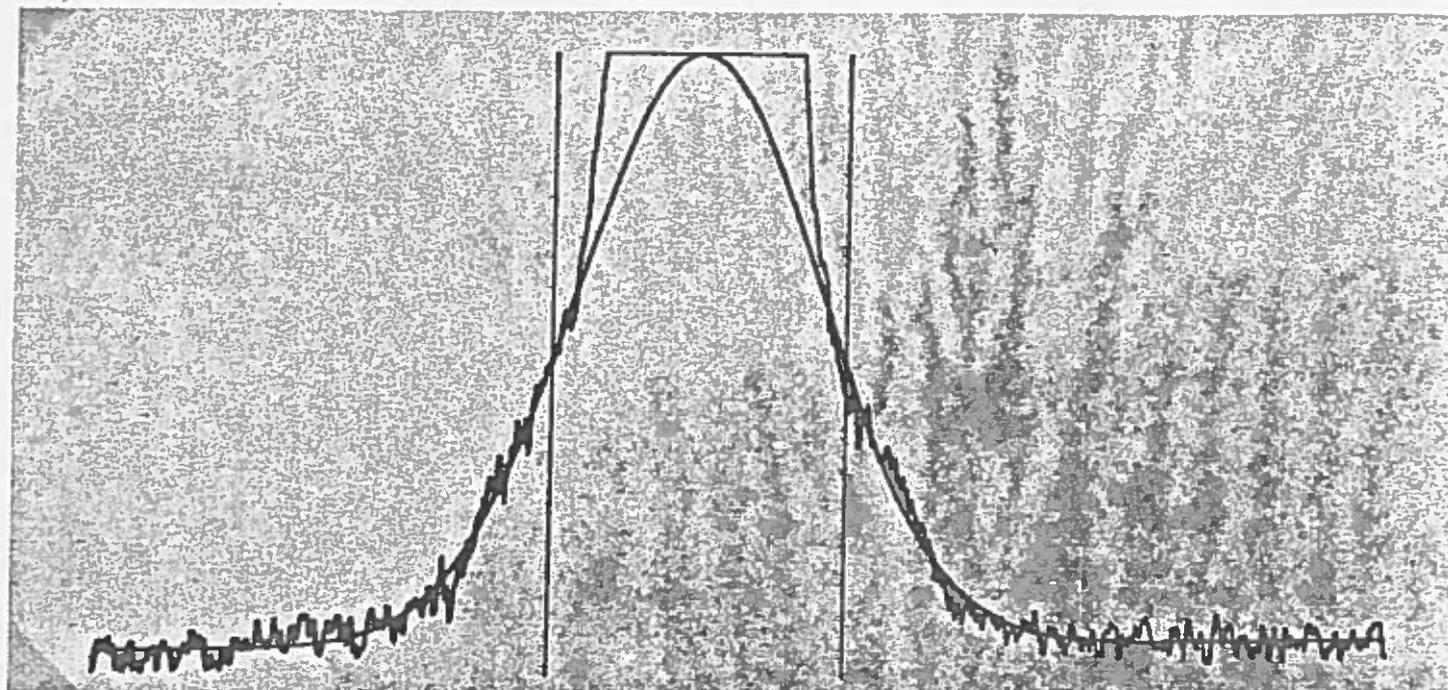


Figura 4.8

Ajuste del diagrama de error eliminando 75 minutos de arco

<u>F.R.</u>	<u>V.E.</u>	<u>V.A.</u>	<u>N.P.</u>	<u>A.E.</u>	<u>C.F.</u>	<u>C.G.</u>	θ_{ec}	$\frac{A.G.C.}{A.T.}$
4.2	44.5	0	1000	40	505	502.9	43.4	0.206
4.3	44.5	0	1000	45	505	503.8	56.7	0.117
4.4	44.5	0	1000	50	505	504.5	64.2	0.091
4.5	44.5	0	1000	55	505	505.0	68.6	0.079
4.6	44.5	0	1000	60	505	504.8	70.3	0.075
4.7	44.5	0	1000	70	505	505.3	71.3	0.072
4.8	44.5	0	1000	75	505	505.2	70.9	0.073

Tabla 4.1

Resultados del ajuste del diagrama de error según A.E.

- F.R. : figura de referencia
V.E. : velocidad en elevación (seg. arco/seg. tiempo)
V.A. : velocidad en acimut (seg. arco/seg. tiempo)
N.P. : número de puntos del barrido
A.E. : anchura de la franja eliminada (min. de arco)
C.F. : centro de la fuente en el barrido (en escala de N.P.)
C.G. : centro de la gaussiana ajustada (en escala de N.P.)
 θ_{ec} : anchura de la gaussiana en min. arco (diag. error convol.)
 $\frac{A.G.C.}{A.T.}$: relación entre la amplitud de la gaussiana convolucionada que se ha determinado y amplitud total (con diag. difrac.)

<u>V.E.</u>	<u>V.A.</u>	<u>N.P.</u>	<u>A.E.</u>	<u>C.F.</u>	<u>C.G.</u>	θ_{ec}	$\frac{A.G.C.}{A.T.}$
-50	0	900	60	419.1	418.6	71.4	0.075
-50	0	900	60	417.6	417.9	71.3	0.074
0	-66.2	900	60	416.1	416.1	70.9	0.072
-50	0	900	60	416.8	416.8	72.3	0.071
0	-62.9	900	60	416.2	416.2	70.3	0.072

Tabla 4.2

Resultados del ajuste del diag. error según elevación y acimut

elevación sino también en acimut para poder apreciar las posibles faltas de simetría en el diagrama, los resultados aparecen en la tabla 4.2 .

Las medidas se hicieron utilizando el demodulador síncrono PAR. No es preciso la obtención de valores absolutos en la amplitud de las medidas, sino tan sólo relativos, por lo que dicha forma de demodulación en el tratamiento de las medidas es especialmente adecuada.

La anchura del diagrama de error en acimut parece ser ligeramente menor que en elevación, no obstante la diferencia es mínima, por lo que se considera simetría en el diagrama, con lo que promediando los resultados obtenidos se tiene:

$$\theta_{ec} (') = 71.2 \pm 0.7 \quad (4.5)$$

$$\frac{A.G.C.}{A.T.} = 0.073 \pm 0.002 \quad (4.6)$$

4.4- Deconvolución de los resultados obtenidos.

Tanto la anchura como la amplitud obtenidas en (4.5) y (4.6) corresponden a la convolución del diagrama de error con el disco solar, que en el instante de las medidas era de 31.5', tal convolución produce un ensanchamiento del haz así como una disminución del valor máximo.

Para corregir el efecto del ensanchamiento se ha utilizado la tabla 4.3⁽³⁾ en la que se da la relación entre la anchura del haz θ_e y la medida θ_{ec} , ambas a potencia mitad, en función de la relación entre la anchura del disco utilizado como fuente θ_s y θ_{ec} .

Con las medidas realizadas

$$\frac{\theta_s}{\theta_{ec}} = \frac{31.5}{71.2} = 0.442$$

con lo que

$$\frac{\theta_e}{\theta_{ec}} = 0.962$$

y

$$\theta_e (') = 68.5 \quad (4.7)$$

θ_s/θ_{ec}	θ_e/θ_{ec}
0.00	1.000
0.10	0.998
0.20	0.993
0.30	0.983
0.40	0.970
0.50	0.951
0.60	0.930
0.70	0.899
0.80	0.858
0.90	0.807
1.00	0.714

Tabla 4.3

θ = anchura del disco fuente
 θ^s = anch. diag. error conv.
 θ_{ec} = anchura diagrama error

A su vez, el valor máximo que se podría medir en el diagrama de error de haber considerado una fuente puntual, se ve multiplicado por un factor F determinado según:

$$F = \frac{8 \ln 2 (1 - \cos \frac{\theta_s}{2})}{\theta_e^2 \left\{ 1 - \exp \left[-\ln 2 \left(\frac{\theta_s}{\theta_e} \right)^2 \right] \right\}} \quad (4.8)$$

donde θ_s es la anchura del disco (diámetro) utilizado como fuente y θ_e la anchura del diagrama a potencia mitad (determinado anteriormente y de valor $\theta_e = 68.5'$). Según lo anterior la corrección que habrá que hacer en la amplitud de pico es de $F=1.075$ con lo que

$$\frac{A.G.}{A.T.} = F \frac{A.G.C.}{A.T.} = 0.078 \pm 0.002 \quad (4.9)$$

es decir, el valor medio del diagrama de difracción en el ángulo cubierto por el disco solar ($31.5'$) es 12.8 veces mayor que el que presenta en su valor máximo el diagrama de error; si se tiene en cuenta que la radiación captada por dicho diagrama de difracción está principalmente concentrada en su lóbulo principal, cuya anchura a potencia mitad es de $1.2'$, se desprende que la amplitud de éste es mucho mayor que la del diagrama de error.

4.5- Radio de correlación de la superficie determinante del diagrama de error.

Conociendo la anchura del diagrama de error es posible determinar el radio de correlación r_c de los errores en la superficie del reflector según⁽⁵⁾

$$r_c = \frac{0.53 \lambda}{\theta_e} \quad (4.10)$$

a 90 GHz se tiene $\lambda = 3.33$ mm y según (4.7) $\theta_e = 68.5' = 19.926 \times 10^{-3}$ rad con lo que

$$r_c = 8.86 \text{ cm} \quad (4.11)$$

el diámetro de aproximadamente 18 cm es del mismo orden de magnitud con que están espaciadas las nervaduras que soportan la superficie de cada panel; ésto significa que la anchura de dicho diagrama depende de la estructura física de los paneles individuales por lo que un reposicionado de los mismos no representaría una mejora sustancial del diagrama de error, aunque sí del diagrama de difracción al suprimir las aberraciones debidas a la deformación gravitatoria del reflector principal (coma y astigmatismo).

4.6- Programa utilizado.

Mediante el programa ADE6 es posible la realización del ajuste del diagrama de error. Es preciso para éllo el disponer de un fichero, sin exceder en 1000 puntos para el actual DIMENSION utilizado, con barridos del Sol de suficiente recorrido (recomendable más de 4º) para poder ajustar una línea de base. Estos barridos pueden ser en elevación, acimut o cruzados, aunque en este último caso hay que poner especial cuidado en asegurarse de pasar por el centro del Sol. El programa considera las condiciones del barrido para obtener la velocidad angular y pasar la escala de puntos almacenada a escala angular de la que obtener θ_{ec} .

Las subrutinas utilizadas que no se encuentran en librería del sistema operativo son DEMAX, COPMI y AFLAN, y precisan por tanto ser cargadas independientemente.

Para correr el programa hay que contestar a las preguntas que va formulando, con lo que se posiciona en el ciclo adecuado; seguidamente se le dá la anchura a eliminar para el ajuste del diagrama de error y tras centrar dicha franja en el Sol, contesta con los puntos anterior y posterior a la franja que se han de incluir en el ajuste de la gaussiana. Seguidamente se entra en la subrutina AJGAU que permite hacer el ajuste, siendo para el caso que interesa de una gaussiana más una recta. Tras realizado dicho ajuste se sale de la subrutina AJGAU y el programa ofrece los resultados de interés, como son: velocidades utilizadas en el barrido, anchura eliminada, centro de la gaussiana así como del Sol, anchura del diagrama de error convolucionado y amplitudes obtenidas. Finalmente y de forma gráfica se obtienen los valores medidos así como el ajuste realizado.

Tras lo anterior se puede recomenzar otra vez el programa con el movimiento en ficheros y registros adecuado.

```

2221 PROGRAM A180
2222 *PI=3.141592653589793238462643383279502884197169399375105820974944592307816406286208996661313174312167265281228772480914930353612317970920226980381443899901329596989566486261254612664866633214726496601680761314182487572152614951172384734761205115939548861927601317964129914661261697932384114111
2223 *AT(PP0),ITL000,TELOC(1),40,FCP0,PC(0)
2224 *C(100),IENAT(05),IENAT(10),IENAT(15)
2225 *Z(1),E(1),C(1),IENAT(14),TELOC(1,1)
2226 ITL000=515432
2227 ITL000=425122
2228 CALL PAGE(0)
2229 302 CALL IONIT
2230 CALL DELOC(0,0,IENAT)
2231 WRITE(2,202)
2232 202 FORMAT("C V JP = EBER: ")
2233 READ(1,*)IO,IF
2234 CALL DELOC(0,IF,IENAT)
2235 JP=IENAT(10)
2236 WAZ=VELOC(IF,3)
2237 WEL=VELOC(IF,4)
2238 EEE=EENAT(15)
2239 WAZ=WAZ*COS(EEE)
2240 WALS=SURT(WEL**2+WAZ**2)
2241 WRITE(2,210)
2242 210 FORMAT("ANCHURA A ELIMINADO (C V I I): ARCO: ")
2243 READ(1,*)AJMP
2244 DO 100 I=1,JP
2245 100 EUFF(I)=12.-EUFF(I)
2246 EUC(I)=1
2247 EUC(0)=JP
2248 EY(1)=EUFF(1)
2249 EY(2)=EUFF(JP)
2250 CALL DEGR(CM, EY, 2,ALD,LEL)
2251 CALL DEGR(CMPP, JP,ALD,LEL, JP00,VIEN,KEIT)
2252 CALL COP(CIDAT, WAZ, FCP1)
2253 JSUP=KEIT+AJMP/FCP1/2.+1.
2254 JINF=KEIT-AJMP/FCP1/2.
2255 WRITE(2,222)JINF,JSUP
2256 222 FORMAT("PUNTO INFERIOR JO ELIMINADO:"I7"/"PUNTO "
2257 *"SUPERIOR JO ELIMINADO:"I7)
2258 WIC(1)=WIC(2)
2259 CALL AJGAB(JP, XI, EUFF, 4, ITL0, 1, 10, WAZ, WEL, WY)
2260 AICM=SURT(4.*ALD(02.) / AIC(0)) * FCP1
2261 EAIC=ALD(02.) / AIC(0) * ((3./2.) * WY(2) * FCP1
2262 (EIT*WIC(2)
2263 ECEIT=WY(2)
2264 DO 101 I=1,JP
2265 101 ECI=EUFF(I)-AY(4)-AY(5)*FLOAT(I)
2266 CALL DEMAX(0, JP, WAZ, WEL, WY(1), WY(2), WY(3))
2267 CALL PAGE(1)
2268 WRITE(2,223)WEL, WAZ, AJMP, KEIT, CEIT, ECEIT
2269 WRITE(2,204)AICM, EAIC, AXC(1), AY(1), VIEN
2270 203 FORMAT("VELOCIDAD E I ELEVACION(S/S): "F10.3/
2271 *"VELOCIDAD E I ACIUT(S/S): "F10.3/
2272 *"ANCHURA ELIMINADA (C V I I) DE ARCO): "F14.2/
2273 *"CENTRO DETERMINADO POR PUNTERIA: "F15.3/
2274 *"CENTRO DE LA GAUSIANA: "F15.3" +- "F5.8)
2275 204 FORMAT("ANCHURA DE LA GAUSIANA: "F14.3" +- "F5.3/
2276 *"AMPLITUD DE LA GAUSIANA: "F15.3" +- "F5.3/
2277 *"AMPLITUD (O) DIABRIA DE DIFRACCION: "F11.3)
2278 PAUSE
2279 DO 102 I=1,JP

```

```

0262 172 Y(1)=X(1)*EXP(-F(1)*X(1)+F(2)*X(1)-F(3)*X(1)+F(4)*X(1)+F(5)
0263 *+F(6)*X(1)
0264 CALL A1AT(X, IP, Y(1), IAP05)
0265 DO 173 I=1, IP
0266 IF(Y(1)-F(1)*X(1)) GO TO 173
0267 173 E(1)=Y(1)
0268 GO TO 173
0269 174 E(1)=F(1)*X(1)
0270 173 CONTINUE
0271 CALL A11(X, IP, E(1), IEM11)
0272 Y(1)=E(1)
0273 CALL PAGE(2)
0274 CALL GRAF(X, IP, P, Q, I123, 750, 3200, A171)
0275 CALL GRAF(Y, IP, P, Q, I123, 750, 3200, A172)
0276 J11F=J11F*I123/IP
0277 JSUP=JSUP*I123/IP
0278 CALL PLOT(1, J11F, 2, J11F, 750)
0279 CALL PLOT(1, JSUP, 2, JSUP, 750)
0280 CALL PAGE(1)
0281 IF(CISSW(15)) GO TO 174
0282 174 E(1)=Y(1)
0283 E(1)=E(1)
0284 E(1)=E(1)

```

```

0285 SUBROUTINE (OP11(IDAT, NABS, NCR1))
0286 DIMENSION I1AT(15)
0287 IDOS=60*(IDAT(14)-I1AT(11))+60*(64*I1AT(15)+I1AT(13)-I1AT(12))
0288 DOSE3=FLOAT(IDOS)+(FLOAT(IDAT(15))-I1AT(13))/100.
0289 FCR1=DOSE3*NABS/60./FLOAT(IDAT(16))
0290 RETURN
0291 END
0292 E(1)=E(1)

```

```

0221 SUBROUTINE BFLA1(BUFF, IP, A1, B1, IP0, X1, X2, X3)
0222 DIMENSION BUFF(1), X1(JP), X2(JP), X3(JP)
0223 DO 100 J=1, JP
0224   100 BUFF(J)=BUFF(J)-A1*FLOAT(J)-B1
0225   CALL AJUPA(BUFF, IP, X1, X2, X3)
0226   DO 101 J=1, JP
0227     XAJUP=IP0-S+1
0228     XAJUP(1)=FLOAT(XAJUP)
0229   101 XAJUP(1)=BUFF(XAJUP)
0230   CALL AJUPA(XAJUP, XAJUP, X1, X2, X3)
0231   X1AX=-X1/(X1*X2)
0232   X1AX=X1*X1*X2+X1*X1AX+X1
0233   X1E1=X1AX/2.
0234   DO 102 J=1, IP0
0235     IF (X1E1-BUFF(J)) 300, 102
0236   102 CONTINUE
0237   XPOS1=J
0238   DO 103 J=IP0, JP
0239     IF (X1E1-BUFF(J)) 200, 301
0240   103 CONTINUE
0241   XPOS2=J
0242   CALL AFLA(BUFF, XPOS1, X1E1, XPOS2)
0243   CALL AFLA(BUFF, XPOS2, X1E1, XPOS1)
0244   XOE1T=(XPOS1+XPOS2)/2.
0245   RETURN
0246   END
0247   END

```

```

0221 SUBROUTINE AFLA(BUFF, XPOS, XAJ, XPOS)
0222 DIMENSION BUFF(1), XAJ(JP), XAJ(JP)
0223 DO 100 J=1, JP
0224   XAJUP=IP0-S+1
0225   XAJUP(1)=FLOAT(XAJUP)
0226   100 XAJUP(1)=BUFF(XAJUP)
0227   CALL AJUPA(XAJUP, XAJUP, X1, X2, X3)
0228   DET=5177*(X1*X2-4.*X1*(X1*X2))
0229   XSOLE1=(-X1+DET)/(2.*X2)
0230   XSOLE2=(-X1-DET)/(2.*X2)
0231   XDI1=ABS(XSOLE1-FLOAT(IP0))
0232   XDI2=ABS(XSOLE2-FLOAT(IP0))
0233   IF (XDI1)-XDI2) 300, 301
0234   300 XPOS=XSOLE1
0235   GO TO 302
0236   301 XPOS=XSOLE2
0237   302 RETURN
0238   END
0239   END

```

5.- MEDIDA DEL ACOPLAMIENTO DE ANTENA A LA RADIACION DEL SOL.

5.1- Significado de η_{sun} .

Con la medida del acoplamiento de antena a la radiación del Sol η_{sun} se pretende determinar la proporción de potencia que entra a la antena dentro del ángulo sólido presentado por el Sol, siendo cuando se realizó la medida de 31.5' de diámetro.

Consiste en hacer medidas con la antena centrada en el Sol, en cuyo caso la temperatura medida será T_{sun} , entrando dicha radiación por el diagrama de difracción así como por parte del de error, y medidas de la temperatura de cielo T_{sky} a la misma elevación que en el caso anterior pero con la antena desplazada en acimut para que ni el diagrama de difracción ni el de error capten la radiación del Sol.

En el primer caso se tendrá

$$T_{\text{sun}} = (1-\eta_1)J(T_{\text{ssp}}) + \eta_1 \left[J(T_{\text{atm}})(1-e^{-\tau A}) + \eta_{1s} J(T_s) e^{-\tau A} + (1-\eta_{1s}) J(T_{\text{bg}}) e^{-\tau A} \right] \quad (5.1)$$

donde η_{1s} designa la proporción de radiación que se acopla al Sol respecto la acoplada al cielo y T_s la temperatura de brillo del Sol.

Respecto la potencia total que capta la antena, la acoplada a un ángulo como el presentado por el Sol será

$$\eta_{\text{sun}} = \eta_1 \eta_{1s} \quad (5.2)$$

con lo que también

$$T_{\text{sun}} = (1-\eta_1)J(T_{\text{ssp}}) + \eta_1 J(T_{\text{atm}})(1-e^{-\tau A}) + \eta_{\text{sun}} J(T_s) e^{-\tau A} + \eta_1 (1-\eta_{1s}) J(T_{\text{bg}}) e^{-\tau A} \quad (5.3)$$

Cuando se mira al cielo, la temperatura medida valdrá

$$T_{\text{sky}} = (1 - \eta_1) J(T_{\text{ssp}}) + \eta_1 J(T_{\text{atm}}) (1 - e^{-\tau A}) + \eta_1 J(T_{\text{bg}}) e^{-\tau A} \quad (5.4)$$

por lo que el incremento que se tiene al mirar el Sol vale

$$\Delta T_{\text{sun}} = T_{\text{sun}} - T_{\text{sky}} = \eta_{\text{sun}} \left[J(T_{\text{s}}) - J(T_{\text{bg}}) \right] e^{-\tau A} \quad (5.5)$$

donde habiendo determinado la atenuación atmosférica cenital τ y conociendo la elevación a que apunta la antena (de la que extraer A) la única incógnita que permanece es η_{sun} .

5.2- Medidas realizadas.

Las medidas realizadas se hicieron en potencia total, es decir, los valores obtenidos son proporcionales a la temperatura de receptor más la de antena.

Para reducir dichos valores, que serán voltajes, a temperaturas, se utiliza como temperatura de calibración T_{cal} la temperatura de receptor más la de la rueda chopper, que en el instante de las medidas y a una frecuencia de oscilador local de 89.5 GHz se estimó en

$$T_{\text{cal}} = T_{\text{rec}} + T_{\text{chop}} = 1204 + 301 = 1505^{\circ}\text{K} \quad (5.6)$$

La atenuación atmosférica se determinó mediante el procedimiento de sky-tipping y resultó ser de $\tau = 0.178 \pm 0.005$ (se realizaron dos sky-tipping, uno anterior y otro posterior a la medida de η_{sun}).

Se hicieron ocho medidas consecutivas de Sol y cielo, los resultados independientes de cada una de ellas se expresan en la Tabla 5.1, utilizándose en todos ellos $T_{\text{cal}} = 1505^{\circ}\text{K}$ y $\tau = 0.178$.

Se observó también en el análisis de las medidas que la rueda chopper no es totalmente impermeable a la radiación del Sol cuando se mira a éste, dando una T_{cal} 1.045 veces mayor a cuando se ve el cielo,

o lo que es lo mismo, un incremento de aproximadamente 68°K en dicha temperatura de calibración, dichos efectos se tuvieron en cuenta y se corrigieron al analizar las medidas realizadas.

<u>E(elev.)</u>	<u>A(m. aire)</u>	<u>$\Delta T_{\text{sun}}/T_{\text{cal}}$</u>	<u>$\eta_{\text{sun}} [J(T_s) - J(T_{\text{bg}})]$</u>
45.9	1.392	1.4464	2788.9
45.7	1.397	1.4421	2783.1
45.5	1.401	1.4425	2785.8
45.3	1.406	1.4368	2777.3
45.2	1.409	1.4565	2816.9
45	1.414	1.4484	2803.7
44.8	1.418	1.4667	2841.2
44.6	1.424	1.4659	2842.6

Tabla 5.1

Medidas realizadas para la determinación de η_{sun}

5.3- Resultados.

Promediando las anteriores medidas se tiene

$$\eta_{\text{sun}} [J(T_s) - J(T_{\text{bg}})] = 2804.9 \pm 26.0 \quad (5.7)$$

considerando una temperatura para el Sol⁽⁴⁾ de $T_s = 7860^{+262}_{-222}$ °K así como $T_{\text{bg}} = 2.8$ °K, se tiene un coeficiente de acoplamiento al Sol

$$\eta_{\text{sun}} = 0.357 \begin{matrix} \pm 0.010 \\ - 0.012 \end{matrix} \quad (5.8)$$

donde la mayor incertidumbre procede de la existente en la determinación de la temperatura del Sol T_s .

6.- DETERMINACION DEL SPILLOVER Y SCATTERING ANTERIOR Y POSTERIOR.

6.1- Distribución de potencias en los diagramas de difracción y error.

Si se denominan

P_d = potencia en el diagrama de difracción

P_e = potencia en el diagrama de error

P_{es} = potencia en el diagrama de error que se acopla al Sol

como ya se ha dicho en el capítulo 1, estas potencias serán proporcionales a las captadas por el diagrama correspondiente para el caso de una fuente extensa, en este caso que abarque el diagrama de difracción y error.

- Según (4.6)

$$\frac{P_{es}}{P_d + P_{es}} = 0.073 \quad (6.1)$$

- normalizando la contribución de ambos diagramas

$$P_d + P_e = 1 \quad (6.2)$$

- considerando el diagrama de error según la expresión (4.1)

$$f_e(\theta) = A_e \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\theta}{\theta_e}\right)^2\right] = A_e \exp(-a\theta^2) \quad (6.3)$$

con

$$A_e = 0.078 \quad (6.4)$$

$$a = \frac{4 \ln 2}{(68.5)^2}$$

la potencia abarcada dentro de un ángulo de radio θ será

$$P(\theta) = \frac{A_e \pi}{a} (1 - e^{-a\theta^2}) \quad (6.5)$$

en las medidas realizadas el diámetro solar era de $31.5'$ con lo que la proporción del diagrama de error que cae dentro de él vale

$$\frac{P(\theta=15.75')}{P(\theta=\infty)} = 0.136 = \frac{P_{es}}{P_e} \quad (6.6)$$

Resolviendo (6.1), (6.2) y (6.6) se tiene

$$\begin{aligned} P_d &= 0.633 \\ P_e &= 0.367 \\ P_{es} &= 0.050 \end{aligned} \quad (6.7)$$

Así pues, la fracción de potencia que en los diagramas de difracción y error se acopla al Sol vale

$$P_d + P_{es} = 0.683 \quad (6.8)$$

6.2- Spillover y scattering anterior y posterior.

De las medidas realizadas anteriormente se tiene

$$(3.40) \quad \eta_1 = 0.721$$

$$(5.8) \quad \eta_{sun} = 0.357$$

$$(6.8) \quad P_d + P_{es} = 0.683$$

El coeficiente de scattering y spillover posterior η_{ssp} será el complemento a la unidad del coeficiente de acoplamiento al cielo η_1 , es decir

$$\eta_{ssp} = 1 - \eta_1 = 0.279 \quad (6.9)$$

De (6.8) se tiene que el 68.3% de la energía captada por el diagrama (difracción más error) se acopla al Sol, a su vez y según (5.8)

esta proporción representa el 35.7% del volumen de radiación captado por la antena, por lo que la eficiencia de diagrama η_d será

$$\eta_d = \frac{1}{P_d + P_{es}} \eta_{\text{sum}} = 0.523 \quad (6.10)$$

y el coeficiente de spillover y scattering anterior η_{ssa} valdrá

$$\eta_{\text{ssa}} = \eta_1 - \eta_d = 0.198 \quad (6.11)$$

La eficiencia del diagrama η_d se distribuirá entre el diagrama de difracción η_{dd} y el diagrama de error η_{de} tal que según (6.7) y (6.10)

$$\eta_{\text{dd}} = P_d \eta_d = 0.331 \quad (6.12)$$

$$\eta_{\text{de}} = P_e \eta_d = 0.192 \quad (6.13)$$

se tiene por tanto la siguiente distribución de potencias de entrada a la antena:

eficiencia del diagrama de difracción	$\eta_{\text{dd}} = 0.331$
eficiencia del diagrama de error	$\eta_{\text{de}} = 0.192$
eficiencia de spillover y scattering anterior	$\eta_{\text{ssa}} = 0.198$
eficiencia de spillover y scattering posterior	$\eta_{\text{ssp}} = 0.279$

posiciones (2) y (3) ó (5) y (6) es aproximadamente la anchura a potencia mitad del haz principal. De esta forma y ajustando una parábola con los valores medidos en (3), (4), (2) y (6), (4), (5) se determina el máximo, de no estar centrado éste en la posición (4); sustrayéndole posteriormente el valor medido en (1) ó (7) es posible determinar la temperatura de antena producida al apuntar a Júpiter.

Expresando lo anterior en fórmulas se tiene que la temperatura de antena cuando apuntaba a Jupiter vale

$$T_s = (1 - \eta_1) J(T_{ssp}) + \eta_1 \left[J(T_{atm})(1 - e^{-\tau A}) + \eta_f J(T_{Jup}) e^{-\tau A} + (1 - \eta_f) J(T_{bg}) e^{-\tau A} \right] \quad (7.1)$$

donde

$$\eta_f = \frac{\eta_d}{\eta_1} \frac{\iint_{\Omega_s} f_d(\theta) d\theta}{\iint_{\Omega_d} f_d(\theta) d\theta} \quad (7.2)$$

es la eficiencia de acoplamiento a la fuente, en este caso Júpiter, de la radiación que se acopla al cielo; $f_d(\theta)$ representa el diagrama de antena (difracción más error), Ω_s el ángulo cubierto por la fuente y Ω_d el abarcado por el diagrama, y η_d/η_1 la eficiencia del diagrama respecto la radiación que se acopla al cielo.

Apuntando al cielo, fuera de Júpiter, se tiene

$$T_{sky} = (1 - \eta_1) J(T_{ssp}) + \eta_1 \left[J(T_{atm})(1 - e^{-\tau A}) + J(T_{bg}) e^{-\tau A} \right] \quad (7.3)$$

y la diferencia entre fuente y cielo vale

$$\Delta T_s = T_s - T_{sky} = \eta_1 \eta_f \left[J(T_{Jup}) - J(T_{bg}) \right] e^{-\tau A} \quad (7.4)$$

que es el incremento en temperatura a medir.

El principal inconveniente que se tuvo en la realización de la observación fué la inestabilidad atmosférica, propia por ser tiempo estival, y que con el beam-switching realizado no se compensaba sufi-

cientemente al ser demasiado lento; así pues, las lecturas (1) y (7) no daban la misma temperatura, existiendo una diferencia (promedio de las doce medidas realizadas) de 0.31°K , diferencia bastante significativa para la temperatura que se quería determinar. Por ésto se descartó promediar los resultados y se prefirió elegir la medida en que la atmósfera se mantuvo más estable, habiendo tan sólo una fluctuación de temperatura atmosférica del comienzo al final de 0.015°K . Se midió así, considerando el ajuste en elevación y acimut

$$\Delta T_s = 1.74 \pm 0.06 \text{ (}^{\circ}\text{K)} \quad (7.5)$$

Para la calibración se consideró la temperatura de sistema que con una frecuencia de oscilador local a 89.5 GHz y temperatura de absorbente de 306°K se estimó en $T_{\text{sis}} = 1511^{\circ}\text{K}$.

La temperatura de antena corregida para atenuación atmosférica $\Delta T'_s$ resulta entonces

$$\Delta T'_s = \Delta T_s e^{+\tau A} = \eta_l \eta_f [J(T_{\text{Jup}}) - J(T_{\text{bg}})] \quad (7.6)$$

siendo la elevación media en la medida de $E = 37.45^{\circ}$ lo que corresponde a $A = 1.643$, que con la atenuación atmosférica determinada de $\tau = 0.152$ queda

$$\Delta T'_s = 2.23 \pm 0.12 \text{ (}^{\circ}\text{K)} \quad (7.7)$$

Todas las anteriores medidas se hicieron en potencia total, es decir, las tensiones manejadas proporcionales a la temperatura de sistema (temperatura de receptor más temperatura de antena).

7.2- Determinación de la eficiencia de apertura.

Para Júpiter se tomó una temperatura de brillo absoluta⁽⁶⁾ de

$$T_{\text{Jup}} = 179.4 \pm 4.7 \text{ (}^{\circ}\text{K)} \quad (7.8)$$

con lo que la temperatura de brillo de radiación a 89.5 GHz vale

$$J(T_{\text{Jup}}) = 177.3 \pm 4.7 \text{ (}^\circ\text{K)} \quad (7.9)$$

y el exceso de temperatura de brillo a detectar

$$J(T_{\text{Jup}}) - J(T_{\text{bg}}) = 176.1 \pm 4.7 \text{ (}^\circ\text{K)} \quad (7.10)$$

y según (7.6) y (7.7), la eficiencia de acoplamiento a la fuente de la radiación que se acopla al cielo vale

$$\eta_f = 0.018 \pm 0.001 \quad (7.11)$$

para el caso de Júpiter.

El diámetro angular medio $2R$ de Jupiter durante la observación era de $33.4''$, lo que corresponde a un ángulo sólido de $\Omega_s = 20.59 \times 10^{-9}$ stereoradianes y la densidad de flujo espectral a medir de

$$S = \frac{2k [J(T_{\text{Jup}}) - J(T_{\text{bg}})]}{\lambda^2} \Omega_s = 892 \pm 23 \text{ U.F.} \quad (7.12)$$

donde $1 \text{ U.F.} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ H}_z^{-1}$ y $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ julios/}^\circ\text{K}$

El area efectiva A_e viene dada⁽⁵⁾ por

$$A_e = \frac{2 k K \Delta T_s'}{S} \quad (7.13)$$

donde K es un factor que vale la unidad para fuentes puntuales mientras que con fuentes tipo disco, como es el caso de Júpiter

$$K = \frac{x^2}{1 - e^{-x^2}} \quad (7.14)$$

con

$$x = (4 \ln 2)^{1/2} \frac{R}{\theta_d} \quad (7.15)$$

R es el radio del disco de la fuente ($16.7''$), mientras θ_d es la anchu

ra del haz principal del diagrama de difracción a potencia mitad (72"), por tanto $x=0.386$, $K=1.076$ y

$$A_e = 7.43 \pm 0.60 \text{ m}^2 \quad (7.16)$$

Corregida para la atenuación producida por el radomo, de 1.1dB, el area efectiva sin radomo A_{esr} queda

$$A_{esr} = 9.57 \pm 0.77 \text{ m}^2 \quad (7.17)$$

que corresponde a una eficiencia de apertura de

$$\eta_a = 0.065 \pm 0.005 \quad (7.18)$$

obtenida a una elevación de $E=37.45^\circ$ y con los ejes del subreflector en las posiciones

$$\begin{aligned} \text{eje X} &= +0.200 \\ \text{eje Y} &= +0.450 \\ \text{eje Z1} &= +0.210 \\ \text{eje Z2} &= +0.260 \\ \text{eje Z3} &= +0.210 \end{aligned} \quad (7.19)$$

Las medidas en los capítulos anteriores se hicieron también con las mismas posiciones para los ejes del subreflector, el no haberse especificado es porque para la realización de dichas medidas, al no depender de la optimización del haz principal, la posición del subreflector no es crítica.

La eficiencia de apertura obtenida del 6.5% es bastante pequeña, ésto es debido a que la elevación a la que se realizó la medida ($E=37.45^\circ$) también es baja comparada con la que se utilizó para el posicionado de los paneles del reflector principal que fué de 90° (ante na mirando al cenit). Por ésto se recomienda el reposicionado de dichos paneles de tal forma que la superficie esté optimizada para elevaciones más usuales en observaciones radioastronómicas, por ejemplo 60° , y se pueda garantizar una mayor cobertura de elevaciones sin que se aprecien deformaciones excesivas en la superficie debidas a efec-

tos gravitatorios.

7.3- Rugosidad superficial del reflector principal.

Se puede estimar el valor cuadrático medio del error en la superficie ξ según⁽⁵⁾

$$\frac{\eta_a}{\eta_{ao}} = \exp\left(-\frac{16 \pi^2 \xi^2}{\lambda^2}\right) \quad (7.20)$$

donde η_a es la eficiencia de apertura medida y η_{ao} la del reflector perfecto que depende de la iluminación producida por la bocina y estimada en 0.62, con todo éllo

$$\xi = 0.4 \text{ mm} \quad (7.21)$$

si como es usual se considera en $\lambda=16\xi$ el límite útil de trabajo en frecuencias, según los anteriores resultados, la antena sería operativa actualmente a partir de longitudes de onda superiores a 6.4 mm, o lo que es lo mismo a frecuencias inferiores a 47GHz, con lo que la eficiencia de apertura sería superior al 35%

7.4- Directividad.

La directividad D que actualmente presenta la antena a 89.5 GHz y 37.45° de elevación resulta

$$D(\text{dB}) = 10 \log \frac{4 \pi A_e}{\lambda^2} = 70.3 \text{ dB} \quad (7.22)$$

7.5- Expresión normalizada del diagrama.

Es interesante poder disponer de una expresión normalizada que englobe los efectos del diagrama de difracción y error en las proximidades del haz principal tal como

$$f_n(\theta) = A_d e^{-4\ln 2 \left(\frac{\theta}{\theta_d}\right)^2} + A_e e^{-4\ln 2 \left(\frac{\theta}{\theta_e}\right)^2} \quad (7.23)$$

donde las anchuras a potencia mitad del haz principal en los diagramas de difracción y error son conocidas y valen $1.2'$ y $68.5'$ de arco respectivamente. La relación entre las amplitudes A_d y A_e puede determinarse según⁽⁵⁾

$$\frac{A_e}{A_d} = \left(\frac{2r_c}{d}\right)^2 \left(\frac{1}{\eta_a} - \frac{1}{\eta_{ao}}\right) \quad (7.24)$$

donde r_c es el radio de correlación superficial de valor 8.86 cm (4.11), d el diámetro de la antena, de 13.7 m, η_{ao} vale 0.62 y η_a ya determinada en (7.18) es de 0.065, así pues

$$\frac{A_e}{A_d} = 2.3 \times 10^{-3} \quad (7.25)$$

y la expresión (7.21) queda

$$f_n(\theta) = 0.9977e^{-4\ln 2 \left(\frac{\theta}{1.2}\right)^2} + 0.0023e^{-4\ln 2 \left(\frac{\theta}{68.5}\right)^2} \quad (7.26)$$

con θ en minutos de arco.

8.- CONCLUSIONES.

A modo de resumen, se exponen a continuación los resultados obtenidos en la caracterización de la antena de 13.7 m del CAY a la frecuencia de 89.5 GHz:

eficiencia del diagrama de difracción (η_{dd})	33.1 %
eficiencia del diagrama de error (η_{de})	19.2 %
eficiencia de spillover y scattering anterior (η_{ssa})	19.8 %
eficiencia de spillover y scattering posterior (η_{ssp})	27.9 %
eficiencia de acoplamiento al Sol (η_{sum})	35.7 %
eficiencia de diagrama ($\eta_d = \eta_{dd} + \eta_{de}$)	52.3 %
eficiencia de acoplamiento al cielo ($\eta_1 = \eta_d + \eta_{ssa}$)	72.1 %
anchura del diagrama de error (θ_e)	68.5'
radio de correlación del error superficial (r_c)	8.86 cm

a 37.45° de elevación:

eficiencia de apertura sin radomo (η_a)	6.5 %
rugosidad superficial (ϵ)	0.4 mm
directividad (D)	70.3 dB
amplitud normalizada del diagrama de difracción (A_d)	0.9977
amplitud normalizada del diagrama de error (A_e)	0.0023

otros parámetros de interés:

anchura del diagrama de difracción (θ_d)	1.2'
coeficiente de transmisión del radomo (K_t)	0.776
temperatura del receptor (T_{rec})	1204 °K

REFERENCIAS.

- (1) ULICH (B.L.). Improved Correction for Millimeter-Wavelength Atmospheric Attenuation. *Ap. Letters*, vol. 21, 1980 (pp. 21-)
- (2) DICKE (R.H.). The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies. *Rev. Sci. Instrum.*, Jul. 1946 (pp. 268-275)
- (3) STUTZMAN (W.L.), KO (H.C.). On the Measurement of Antenna Beamwidth using Extraterrestrial Radio Sources. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, May 1974 (pp. 493-495)
- (4) ULICH (B.L.). Millimeter-Wavelength Continuum Calibration Sources. Multiple Mirror Telescope Observatory. Jun. 1981
- (5) BAARS (J.W.M.). The Measurement of Large Antennas with Cosmic Radio Sources. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Jul. 1973 (pp. 461-474)
- (6) ULICH (B.L.), DAVIS (J.H.), RHODES (P.J.), HOLLIS (J.M.). Absolute Temperature Measurement at 3.5 mm Wavelength. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, May 1980 (pp. 367-377)

INDICE.

1.- INTRODUCCION	1
1.1 Distribución de potencias de entrada en la antena	2
2.- DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE RUIDO DEL RECEPTOR	5
2.1 Error en la determinación de T_{rec}	9
3.- MEDIDAS DE SKY-TIPPING	11
3.1 Análisis del método	11
3.1.1 Contribución atmosférica	11
3.1.2 Modelo utilizado	12
3.1.3 Efectos del radomo	15
3.2 Medidas realizadas	18
3.2.1 Realización de un sky-tipping (ST14)	20
3.2.2 Comentarios a los sky-tipping realizados	23
3.3 Coeficiente de acoplamiento al cielo η_1	24
3.3.1 Determinación de η_1	24
3.3.2 Errores en la determinación de η_1	25
3.4 Determinación de la atenuación atmosférica τ	27
3.4.1 Determinación de τ por medio de una, dos y tres masas de aire	28
3.5 Imprecisiones en la realización de sky-tipping	30
3.6 Programa utilizado	31
4.- DETERMINACION DEL DIAGRAMA DE ERROR	36
4.1 Significado del diagrama de error	36
4.2 Fundamentos para su determinación	36
4.3 Medidas realizadas	38
4.4 Deconvolución de los resultados obtenidos	44

4.5 Radio de correlación de la superficie determinante del diagrama de error	46
4.6 Programa utilizado	47
5.- MEDIDA DEL ACOPLAMIENTO DE ANTENA A LA RADIACION DEL SOL	51
5.1 Significado de η_{sun}	51
5.2 Medidas realizadas	52
5.3 Resultados	53
6.- DETERMINACION DEL SPILLOVER Y SCATTERING ANTERIOR Y POSTERIOR	54
6.1 Distribución de potencias en los diagramas de difracción y error	54
6.2 Spillover y scattering anterior y posterior	55
7.- EFICIENCIA DE APERTURA. RUGOSIDAD SUPERFICIAL. DIRECTIVIDAD	57
7.1 Temperatura de antena con Júpiter	57
7.2 Determinación de la eficiencia de apertura	59
7.3 Rugosidad superficial del reflector principal	62
7.4 Directividad	62
7.5 Expresión normalizada del diagrama	63
8.- CONCLUSIONES	64
REFERENCIAS	65
INDICE	66