

Informe Técnico CAY 1987-6

Sobre la calibración de espectros
en la banda de 40 a 50 GHz en el CAY

P. Planesas, M.P. Zugasti

INDICE

=====

1. Nuestro conocimiento actual de la atmósfera de Yebes
 1. Opacidad cenital atmosférica
 2. Parámetros atmosféricos
 3. Cálculo de la temperatura de la atmósfera

2. Temperatura de calibración
 1. Frecuencia del OL = 44.4 GHz
 2. Frecuencia del OL = 47.7 GHz

3. Comentarios finales

Tablas

Bibliografía

SOBRE LA CALIBRACION DE ESPECTROS EN LA BANDA DE 40 A 50 GHz

Los espectros que se obtienen con el Radiotelescopio del Centro Astronómico de Yebes llegan al observador están calibrados de manera automática, por medio del programa ANESB, en la escala T_{a^*} . (Para una discusión detallada de las distintas escalas, véase Montalbán, 1987). Para llevar a cabo tal calibración se requiere el conocimiento de la opacidad y la emisividad atmosféricas, así como su dependencia con los parámetros físicos que la caracterizan (temperatura ambiente y humedad relativa, entre otros).

En la actualidad el observador no introduce ninguno de estos valores en el programa de observación y la calibración se realiza de una forma simple: a la frecuencia de la transición J:1-0 de CS (~ 49.0 GHz) se considera una ecuación obtenida con valores medios de los parámetros atmosféricos y en la que la temperatura de calibración T_{cal^*} depende de la elevación; a las demás frecuencias se toma un valor constante ($T_{cal^*} = 400$ K), que es una buena aproximación (salvo un factor multiplicativo) para la transición J=1:0 de SiO (~ 43.1 GHz).

En este trabajo proponemos una manera de calcular T_{al^*} a partir de datos atmosféricos tomados en superficie y de la frecuencia de la transición. Los resultados que se obtienen se ajustan bastante bien a los datos por Martín-Pintado y Fernández (1986) para las dos transiciones antes citadas. En particular, explica la independencia de la temperatura de calibración respecto de la elevación para la frecuencia de SiO.

1 Nuestro conocimiento actual de la atmósfera en Yebes

Los trabajos llevados a cabo por Martín-Pintado (1979) y Martín-Pintado y Fernández (1986) a partir de medidas realizadas durante un año con un higrómetro infrarrojo y a lo largo de varios años mediante radiosondeos y skytippings han permitido la caracterización estadística de la atmósfera en Yebes en lo concerniente a las observaciones radioastronómicas en el rango de frecuencias en el que se viene trabajando los últimos años (aproximadamente entre 41 y 49 GHz).

La toma de datos meteorológicos llevada a cabo día a día en Yebes a lo largo de los últimos cinco años (Planesas, Delgado, Serra, Pérez Murano y Zugasti, 1987) ha permitido realizar un análisis estadístico fiable de las condiciones atmosféricas en Yebes promediadas mes a mes.

1.1 Opacidad cenital atmosférica

Los resultados principales son los siguientes:

1. La opacidad del oxígeno se mantiene aproximadamente constante a lo largo de todo el año.
2. La opacidad del oxígeno varía considerablemente a lo largo de la banda de 40 a 50 GHz, debido a la presencia de una amplia banda de emisión que se encuentra a frecuencias alrededor de 60 GHz.
3. La opacidad del vapor de agua se puede expresar muy aproximadamente como una función lineal de la cantidad de agua precipitable presente en la atmósfera.
4. Para una misma cantidad de agua precipitable, la opacidad del vapor de agua varía ligeramente de una frecuencia a otra dentro de la banda de interés.

En la tabla 1 se encuentran los valores que permiten el cálculo de ambas opacidades. Hemos tratado de ajustar estos parámetros a fin de obtener fórmulas sencillas que permitan usar estos valores sin necesidad de tablas. Para la opacidad del vapor de agua se tiene una dependencia con la frecuencia (ν , en GHz) y con la cantidad de agua precipitable (w , en mm) de la forma:

$$\tau_{H_2O} = \frac{(5w + 3)(\nu - 25)}{40000} \quad (1)$$

Para la opacidad del oxígeno ha sido necesario usar una función más rara: no ha sido posible ajustar los valores medidos con funciones tipo potencial o exponencial. Dado que dicha opacidad es debida, principalmente, a la suma de las alas de un numeroso grupo de lorentzianas, se ha intentado el ajuste con una función similar a ésta, con resultados muy satisfactorios (dentro del 3% dentro de toda la banda considerada). Tal función es:

$$\tau_{O_2} = \frac{3100 \nu}{(3273 - \nu^2)^2} \quad (2)$$

1.2 Parámetros atmosféricos

En la tabla 2 pueden encontrarse el valor medio obtenido mes a mes para la temperatura ambiente con medidas realizadas en el propio Observatorio así como la cantidad de agua precipitable (w) calculada a partir de dicha

temperatura ambiente, la humedad relativa y una variación exponencial de la densidad de vapor de agua con la altura. Este modelo es muy aproximadamente correcto en promedio, pero en un instante dado tal distribución puede alejarse bastante de él.

Partiendo de los valores medios mensuales, se ha realizado un ajuste lineal de w con la temperatura ambiente (T_{amb}), obteniendo:

$$w = 4.4 + 0.35 (T_{amb} - 273) \quad \text{mm} \quad (3a)$$

Este resultado es similar al obtenido por Martín-Pintado (1979) mediante medidas directas con un higrómetro infrarrojo:

$$w = 1.0 + 0.4 (T_{amb} - 273) \quad \text{mm} \quad (3b)$$

Esta última relación da sistemáticamente valores menores para w . Sin embargo hay que tener en cuenta que se obtuvo mediante observaciones realizadas únicamente en días claros, mientras que la precedente se ha obtenido con valores promedio en que no se han descartado los días nublados ni los lluviosos (que son pocos).

La ecuación (3a), por otra parte, se ha obtenido a partir de las temperaturas medias y humedades relativas medias mensuales. Es decir, no es aplicable a una temperatura ambiente instantánea. En este caso se debe usar la ecuación (5).

1.3 Cálculo de la temperatura de la atmósfera

De una manera aproximada (hasta el 2%), para la banda de frecuencias que nos interesa la temperatura de la atmósfera puede ser calculada mediante:

$$T_{atm} \sim 0.92 T_{amb} \quad (4)$$

donde T_{amb} es la temperatura ambiente expresada en K. Esta relación se deduce de los resultados de Martín-Pintado y Fernández (1986) (ver su tabla IV) o de lo que viene a continuación.

Dadas la temperatura ambiente (T_{amb} , en K) y la humedad relativa (U , en tanto por uno), se puede estimar la cantidad de agua precipitable a la altura de Yebes mediante:

$$w = 6.1 U \left(\frac{273}{T_{amb}} \right)^{6.31} \exp \left(25.22 \frac{T_{amb}-273}{T_{amb}} \right) \quad (5)$$

según puede verse en Planesas et al. (1987). Conocido este valor, se puede calcular la opacidad debida al vapor de agua

(τ_{H2O}) y la total ($\tau = \tau_{H2O} + \tau_{O2}$) para una frecuencia dada a partir de las ecuaciones (1) y (2). (Si se trata de un receptor en doble banda lateral, como el instalado en Yebes, se usa la frecuencia del Oscilador Local.) La temperatura de la atmósfera se puede estimar de una manera bastante precisa mediante la ecuación:

$$T_{atm} = 0.90 T_{amb} + (0.10 T_{amb} - 10) \frac{\tau_{H2O}}{\tau} \quad (6)$$

deducida de las ecuaciones A15-A17 de Kutner y Ulich (1981).

2 Temperatura de calibración

Para el caso de una antena situada dentro de un radomo y con un receptor en doble banda lateral, la temperatura de calibración T_{cal}^* viene dada por (Martín-Pintado y Fernández, 1986):

$$T_{cal}^* = 2 (T_{amb} - \eta_{tR} T_{atm}) e^{\frac{\tau_s A}{2}} + \eta_{tR} T_{atm} [2 + (\tau_s - \tau_i) A] \quad (7)$$

donde τ_s y τ_i indican la opacidad total en las bandas señal e imagen, respectivamente, A es el número de masas de aire y η_{tR} el coeficiente de transmisión del radomo. Para una elevación de 19° el número de masas de aire es 3; para 14° , es 4. En lo que sigue nos limitaremos a las situaciones en que $A < 3$ (o sea, a elevaciones iguales o mayores que 20° , la elevación menor a que se suele observar).

Para la determinación de T_{cal}^* es necesario, pues, disponer de la temperatura ambiente y de la cantidad de agua precipitable, pues ambos valores son necesarios para la determinación de las opacidades (τ_s y τ_i) así como de la temperatura de la atmósfera. Es necesario, además, conocer la transmisión del radomo a la frecuencia de trabajo. En caso de no poder realizar medidas instantáneas de los parámetros atmosféricos, se pueden recurrir a los valores medios que se encuentran en la tabla 2.

Vamos a analizar a continuación los resultados que se obtienen en la determinación de T_{cal}^* en los dos casos que más nos interesan (frecuencia de la transición J:1-0 ($v=1$) de SiO y frecuencia de la transición J:1-0 de CS) y que han sido analizados previamente por Martín-Pintado y Fernández (1986).

2.1 Frecuencia del OL = 44.4 GHz

	frecuencia	tau_02	tau_H2O
señal	43.1	0.067	0.0023 (w + 0.6)
O.L.	44.4	0.081	0.0024 (w + 0.6)
imagen	45.7	0.101	0.0026 (w + 0.6)

Utilizando los valores atmosféricos de la tabla 2 podemos ver como varían a lo largo del año los diversos parámetros que participan en el cálculo de la temperatura de calibración.

1. Tamb : varia entre 277 (enero) y 297 (julio), con un valor medio de 286 K.
2. Tatm : varia entre 252 y 273 K, con un valor medio de 262 K.
3. tau_s : varia entre 0.082 y 0.097, con un valor medio de 0.089
4. tau_s - tau_i : varia entre -0.036 y -0.038 para w entre 6 y 13 mm, valores medios mensuales extremos (enero y julio).

Dado que tau_s tiene un valor relativamente pequeño y que nos limitamos a un número de masas de aire $A < 3$, podemos desarrollar la exponencial que aparece en la expresión de Tcal_* en serie de potencias. Si el desarrollo se lleva a cabo sólo hasta el término en A^1 , el error que se comete en Tcal_* es menor que el 1%. Su nueva expresión es:

$$Tcal_* = 2 Tamb + 2 [(Tamb - \eta R Tatm) tau_s + \eta R Tatm (tau_s - tau_i)/2] A \quad (8)$$

Sustituyendo los valores medios mensuales en esta ecuación podremos saber la importancia relativa de sus términos. Los valores que toma

$$(Tamb - \eta R Tatm)$$

a lo largo del año no difieren de su valor medio (77 K) en más del 3%. (Se ha tomado $\eta R = 0.80$). El valor medio de

$$(Tamb - \eta R Tatm) tau_s$$

está próximo a 7 K. El valor medio de

$$\eta R Tatm (tau_s - tau_i)/2$$

está próximo a -4 K, con lo cual compensa en gran parte el anterior.

En conclusión, resulta que el factor que multiplica a A es muy pequeño (~ 6 K) y mantiene su valor a lo largo del año en un margen muy pequeño (entre 5 y 7 K) debido a que se compensan en gran parte los sumandos en que influye el número de masas de aire. Para esta transición, la temperatura de calibración se puede expresar como:

$$T_{cal_*} = 2 T_{amb} + 6 A \quad (9)$$

Si se prescinde del sumando en A, se comete un error de $\sim 4\%$.

Esta expresión para T_{cal_*} está de acuerdo con los resultados obtenidos por Martín-Pintado y Fernández (1986), según los cuales a la frecuencia de 44.4 GHz la calibración es independiente de la elevación pero dependiente de la temperatura ambiente según:

$$T_{cal_*} = 3.52 (T_{amb} - 295) + 580 \quad (10)$$

Por lo que acabamos de ver, tal independencia sólo es cierta en la banda lateral inferior. La dependencia con la temperatura ambiente es distinta pero, habida cuenta que los valores de T_{amb} varían entre 268 y 308 K (-5 y 35 °C), la diferencia entre ambas fórmulas no llega al 10%.

En la Tabla III de Martín-Pintado y Fernández (1986) se detallan los ajustes de los parámetros que intervienen en la calibración a datos obtenidos mediante numerosos skytippings. En ellos se obtienen valores de la opacidad τ_{OL} entre 0.14 y 0.22, sensiblemente mayores que los calculados a partir de los datos de radiosondeos. Hemos realizado el ajuste de aquellos datos imponiendo los valores calculados para la opacidad según las ecuaciones (1) y (2) y dejando libres sólo los coeficientes multiplicativos. Se han obtenido muy buenos ajustes ($r^2 \sim 0.999$) pero los coeficientes resultan inexplicables (uno de ellos es negativo, compatible con un valor $\eta_R=1.3$).

2.2 Frecuencia del OL = 47.7 GHz

	frecuencia	τ_{O2}	τ_{H2O}
señal	49.0	0.200	0.0030 (w + 0.6)
O.L.	47.7	0.149	0.0028 (w + 0.6)
imagen	46.4	0.115	0.0027 (w + 0.6)

Utilizando los valores atmosféricos de la tabla 2 podemos ver como varían a lo largo del año los diversos parámetros que participan en el cálculo de la temperatura de calibración.

1. T_{atm} : varia entre 250 y 270 K, con un valor medio de 259 K.
2. τ_s : varia entre 0.220 y 0.239, con un valor medio de 0.229
3. $\tau_s - \tau_i$: varia entre 0.087 y 0.089 para w entre 6 y 13 mm, valores medios mensuales extremos (enero y julio).

Aunque el valor de τ_s es mayor que en el caso anterior, dado que nos limitamos a un número de masas de aire $A < 3$, podemos desarrollar la exponencial que aparece en la expresión de T_{cal}^* en serie de potencias. Si el desarrollo se lleva a cabo hasta el término en A^2 , el error que se comete en T_{cal}^* es menor del 2%. Su nueva expresión es:

$$T_{cal}^* = 2 T_{amb} + 2 \left[(T_{amb} - \epsilon_R T_{atm}) \tau_s + \epsilon_R T_{atm} (\tau_s - \tau_i) / 2 \right] A + 2 (T_{amb} - \epsilon_R T_{atm}) \tau_s^2 / 2 A^2 \quad (11)$$

Sustituyendo los valores medios mensuales en esta ecuación podremos saber la importancia relativa de sus términos. Los valores que toma

$$(T_{amb} - \epsilon_R T_{atm})$$

a lo largo del año no difieren de su valor medio (53 K) en más del 2%. (Se ha tomado $\epsilon_R = 0.90$). El valor medio del término que multiplica al número de masa de aire A es elevado, pues en este caso no se cancelan los dos sumandos. Además, el valor de τ_s es grande (~ 0.23), así como el de la diferencia de opacidad entre las dos bandas ($= 0.088$).

Si escribimos T_{cal}^* de la forma:

$$T_{cal}^* = 2 T_{amb} + \alpha A + \beta A^2$$

resulta que el valor de α varia a lo largo del año entre 42 y 47 (valor medio 45) y el valor de β varia entre 2.5 y 3.1 (valor medio 2.8). Por el hecho de usar estos valores medios, se comete un error que no excede al 4% en ninguna época del año.

Si se decide mantener la fórmula de T_{cal}^* en forma exponencial, según los datos aquí reseñados, se tienen las siguientes fórmulas:

verano ($j+j+a+s$) :

$$T_{cal}^* = 108 e^{0.238 A} + 482 (1 + 0.044 A) \quad (12a)$$

invierno (d+e+f+m) :

$$T_{cal_*} = 104 e^{0.220 A} + 453 (1 + 0.044 A) \quad (12b)$$

En el programa ANESB se utiliza la fórmula:

$$T_{cal_*} = 99 e^{0.24 A} + 492 \quad (12c)$$

según los resultados obtenidos por Martín-Pintado y Fernández (1986). Como se puede apreciar, concuerda bastante bien con la ecuación (12a) que hemos determinado para el verano. La discrepancia mayor se da a bajas elevaciones, siendo del 10% para A=3.

Como en el caso anterior, se ha procedido a un ajuste de las funciones determinadas a partir de radiosondeos con una función del tipo (12). Los resultados obtenidos han sido muy concordantes en los tres casos para los que se dispone de datos, deduciéndose, además, los valores $\eta_{tal} = 0.91$ y $\eta_{tR} = 0.88$.

3 Comentarios finales

La aplicación de las ecuaciones (1), (2) y (6) en el cálculo de la temperatura de calibración T_{cal_*} mediante la ecuación (7) funciona con bastante acuerdo con los resultados previos.

Para aplicar tales ecuaciones a una frecuencia cualquiera dentro del rango de 40 a 50 GHz es necesario conocer la dependencia de los efectos del radar con la frecuencia.

TABLA 1

Opacidad cenital del oxígeno y del vapor de agua en el Centro Astronómico de Yebes determinadas mediante datos de radiosondeos

frecuencia v , GHz	tau_O2	tau_H2O term. indep.	pendiente
40	0.0458	0.0012	0.002
42	0.0585	0.0013	0.002
44	0.0771	0.0015	0.002
46	0.1060	0.0016	0.003
48	0.1551	0.0017	0.003
50	0.2600	0.0019	0.003

TABLA 2

Parámetros atmosféricos en Yebes promediados mes a mes a lo largo de un periodo de 5 años

mes	temperatura ambiente t (°C)	Tamb (K)	cant. agua prec. w (mm)
ene	3.9	277	6.0
feb	5.1	278	6.0
mar	7.8	281	6.5
abr	10.0	283	7.4
may	13.4	287	9.0
jun	19.6	293	11.8
jul	23.9	297	12.3
ago	21.8	295	12.2
set	19.7	293	11.5
oct	14.2	287	9.3
nov	8.6	282	8.2
dic	5.4	279	6.4
promed.	12.8	286	8.9

*1.56

Bibliografía

- Kutner, M.L., Ulich, B.L. : 1981, Ap. J. 250, 341
- Martín-Pintado, J. : 1979, Tesina de Licenciatura, U.C.M.
- Martín-Pintado, J., Fernández, D. : 1986, "Caracterización de la atmósfera del CAY para su utilización en la calibración de radioobservaciones", Boletín Astronómico del OAM 9(5),33
- Montalbán, J. : 1987, "Calibración de espectros milimétricos en el Centro Astronómico de Yebes", Informe Técnico del CAY 1987-7
- Planesas, P., Delgado, L.A., Serra, M., Pérez Murano, F., M.P. Zugasti : 1987, "Parámetros atmosféricos medidos y determinados en el CAY desde marzo 1982 hasta junio 1987", Informe Técnico del CAY 1987-5