

Informe de Instrumentación Radioastronómica

Autor: Vicente Maldonado A.
Profesor: Leonardo Bronfman A.
Auxiliar: Javier Silva F.
Fecha de entrega: 4 de mayo de 2021

Resumen

La observación del cielo nocturno mediante radio telescopios supone una serie de desafíos en cuanto a la precisión y calibración, que van desde la obtención de la temperatura de ruido del receptor hasta el cálculo de el aporte de la atmósfera en las observaciones. En este informe se estudiará la calibración del radio telescopio mediante el *Hot Call Test* y el *Antenna Dipping*. Luego se visualizarán los datos obtenidos al observar la *Nebulosa de Orión* y se evaluará el *pointing* de la antena. Finalmente, se promediarán varias observaciones de un mismo espectro y se llegará a una relación empírica para la disminución del ruido.

1. Introducción

La obtención de datos a través del radio telescopio necesita una previa calibración de este, para poder calcular el ruido del receptor y la contribución de la atmósfera, con el objetivo de evitar que alteren las observaciones.

En este informe se estudiará la calibración del Radio Telescopio *MINI*, ubicado en Cerro Calán, Santiago de Chile. Este radio telescopio cuenta con una antena primaria de 1,2 metros, y un Receptor HEMT que trabaja en frecuencias de 86 a 115 GHz. El *MINI* tiene 2 espectrómetros de banco de filtros de 256 canales cada uno, obteniendo resoluciones espectrales de 0.1 MHz y 1.0 MHz respectivamente. El radio telescopio cuenta con una antena primaria encargada de recibir las ondas de radio y dirigirlas a la antena secundaria, que concentra las ondas en el receptor.

El radio telescopio recibirá un valor de potencia por cada canal de frecuencia, esta potencia es proporcional a la temperatura. Por otro lado, la frecuencia es proporcional a la velocidad debido al efecto Doppler, por lo que se podrá obtener un espectro de temperatura para cada velocidad. Sin embargo, la temperatura obtenida requiere una corrección por el efecto de la temperatura de ruido del propio receptor y por el grosor de la atmósfera, es por esto que es necesario hacer el *Hot Call Test* y el *Antenna Dipping*.

Una vez calibrado el radio telescopio es posible empezar la observación, en este caso se observará la *Nebulosa de Orión*, para ello el telescopio obtendrá los espectros en cinco posiciones diferentes. La observación consiste en apuntar a la nebulosa para la observación inicial y luego trasladarse una cierta distancia angular hacia arriba y abajo y también a cada uno de los lados, formando una cruz de espectros. Esto con el objetivo de evaluar el *pointing* de la antena. Finalmente, se integrarán los espectros obtenidos luego de tres mediciones y se llegará a una relación para la disminución del ruido en función de la cantidad de observaciones.

2. Calibración del Radio Telescopio

2.1. *Hot Call Test*

2.1.1. Marco Teórico

Es posible relacionar la potencia ω con la temperatura T de una resistencia R mediante la siguiente expresión:

$$\omega = \Delta\nu RT \quad (1)$$

Con R como la constante de Boltzmann y $\Delta\nu$ como un ancho de banda arbitrario de frecuencias. Por otro lado, la antena tiene una temperatura de ruido (T_{rec}) que esta asociada a la sensibilidad del receptor, esta temperatura tiene una ganancia $G_r = R\Delta\nu$, de modo que la potencia que obtiene al recibir una temperatura T_A es de la forma:

$$\omega_A = G_r K T_{rec} + G_r K T_A \quad (2)$$

2.1.2. Procedimiento y Resultados

Para obtener T_{rec} se introducirá entre la antena secundaria y el receptor una carga a alta temperatura ($T_H = 300$ K), de modo que el receptor registra el valor de la potencia recibida debido a la carga caliente, obteniendo una potencia $\omega_H = -44.5$ dBm $= 3.55 \cdot 10^{-8}$ Watts.

$$\omega_H = G_r K T_{rec} + G_r K T_H \quad (3)$$

Una vez registrado el valor de ω_H , se efectua el procedimiento análogo pero con una carga a baja temperatura ($T_C = 77$ K), obteniendo $\omega_C = -47.94$ dBm $= 1.61 \cdot 10^{-8}$ Watts.

$$\omega_C = G_r K T_{rec} + G_r K T_C \quad (4)$$

Para lograr una mejor precisión lo recomendable es utilizar cargas con un ΔT alto. Se define y_{factor} como:

$$y_{factor} = \frac{\omega_H}{\omega_C} \quad (5)$$

Despejando T_{rec} en las ecuaciones 2 y 3 se obtiene la siguiente expresión:

$$T_{rec} = \frac{T_H - T_C \cdot y_{factor}}{y_{factor} - 1} \quad (6)$$

En el caso del telescopio *MINI*, calcula T_{rec} mediante su software controlador, el programa entrega el espectro para cada una de las cargas y el valor de T_{rec} del telescopio, en la experiencia práctica se obtuvo un valor de 150.9 K.

2.1.3. Cálculo de T_{rec} y Discusión

Con los valores introducidos de $T_H = 300$ K, $T_C = 77$ K, se obtuvieron potencias de $\omega_H = 3.55 \cdot 10^{-8}$ Watts y $\omega_C = 1.61 \cdot 10^{-8}$ Watts. Con esto es posible calcular manualmente y_{factor} y finalmente la temperatura de ruido del sistema, el valor obtenido fue de $T_{rec} = 107.6$ K.

Es posible notar que se diferencia en casi 50 K del valor calculado con el software del telescopio, esto puede ser debido a que no se haya utilizado el mismo ancho de banda para medir ω que el que se utilizó en la experiencia práctica. Tambien es posible que el software considere otro tipo de perturbaciones en la electrónica del receptor que se escapan de nuestro cálculo, o que el comportamiento de y_{factor} no sea lineal.

2.2. Antenna Dipping

2.2.1. Marco Teórico

Para calibrar el telescopio es necesario medir la contribución de la atmósfera al momento de medir una cierta potencia. La potencia recibida del cielo en función del ángulo de elevación de la antena es calculada con:

$$\omega_{sky}(El) = C \cdot (T_{rec} + T_{atm}(1 - e^{-\tau_0/\sin(El)})) \quad (7)$$

En donde el segundo término representa la temperatura del cielo T_{amb} menos una contribución atmosférica $T_{atm} \cdot e^{-\tau_0/\sin(El)}$. Si se ignora este término podemos calcular la potencia proveniente del cielo en un entorno ideal sin atmósfera.

$$\omega_{amb}(El) = C \cdot (T_{rec} + T_{atm}) \quad (8)$$

Luego se define un $\Delta\omega$ como:

$$\Delta\omega(El) = C \cdot (T_{atm} \cdot e^{-\tau_0/\sin(El)}) \quad (9)$$

Aplicando logaritmo natural a ambos lados de la ecuación se obtiene:

$$\ln(\Delta\omega) = \ln(C \cdot T_{atm}) - \frac{\tau_0}{\sin(El)} \quad (10)$$

Para obtener τ_0 se graficará $\Delta\omega$ en función de $1/\sin(El)$, para diferentes elevaciones. Luego se hará un ajuste lineal de modo que la pendiente de esa recta será el valor de τ_0 .

2.2.2. Procedimiento y Resultados

En el programa de control del telescopio es posible programar la calibración atmosférica, luego el telescopio registra valores para la potencia de 10 elevaciones distintas y toma una ultima medida del domo para calcular algunos parametros. Una vez realizadas las mediciones, se introducen los datos del clima y finalmente el software ajusta los datos a una curva que nos permite obtener parámetros de calibración tales como; la contribución atmosférica del agua, τ_w ; la eficiencia del telescopio, η ; etc. El software del telescopio no solo considera la contribución del agua sino que también la contribución del oxígeno. El valor de τ_w calculado en la experiencia práctica fue de 0.423 .

En cuanto a los datos utilizados para esta medición, se registraron 10 valores para la potencia en diferentes elevaciones y una medición con la antena apuntando hacia el domo, utilizada como ω_{amb} . el valor de la potencia obtenida para cada elevación se ilustra en la Figura 1.

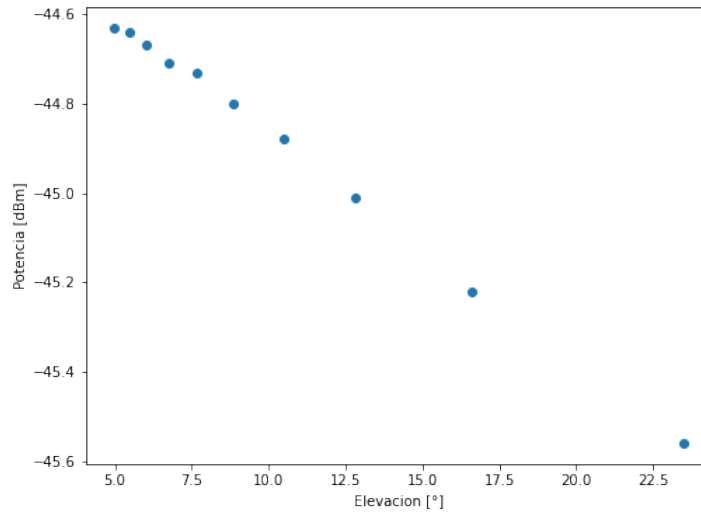


Figura 1: Potencia obtenida para diez elevaciones distintas.

2.2.3. Cálculo de τ_0 y Discusión

Para el cálculo de τ_0 se realiza un ajuste lineal de $\ln(\Delta\omega)$ en función de $1/\sin(EI)$, tal como se muestra en la Figura 2. A partir del ajuste, se encontró $\tau_0 = 0.257$.

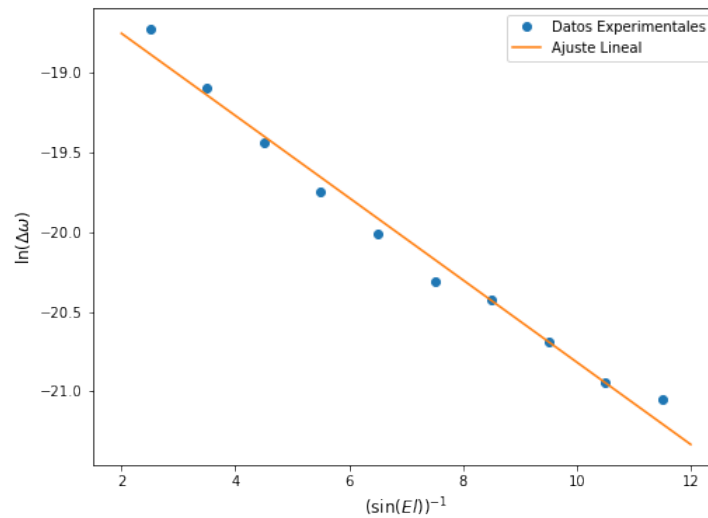


Figura 2: $\ln(\Delta\omega)$ en función de la secante de la elevación.

Las diferencias entre el valor obtenido y el calculado se deben principalmente a que el cálculo de la contribución atmosférica en el software del telescopio es realizado con otro modelo. También hay que considerar que el software del MINI calcula por separado la contribución del agua y del

oxígeno, mientras que en esta experiencia se consideró un único τ_0 , por lo que tiene sentido que existan diferencias en los valores. Por otro lado, es importante mencionar que esta medición se realiza periódicamente, cada vez que cambien las condiciones climáticas, por lo que es posible que el set de datos utilizados para calcular τ_0 en esta experiencia hayan sido distintos a los del día de la experiencia práctica.

3. Observaciones

3.0.1. Importancia de la Calibración

Una vez calibrado el telescopio ya es posible realizar observaciones del cielo, de tal forma que es posible corregir la temperatura de ruido del receptor y los efectos de la atmósfera, para obtener la temperatura de la fuente que se observa.

3.1. Datos obtenidos

En este caso se observó la *Nebulosa de Orión*, el telescopio toma datos de temperatura para cada velocidad en cinco puntos distintos, formando una cruz con la observaciones, en el punto central se encuentra la Nebulosa mientras que el resto de espectros representan sus cercanías. El radio telescopio realizó tres mediciones de cada uno de los cinco espectros. En las siguientes Figuras 3, 4 y 5, se observan los cinco espectros ubicados espacialmente con un ajuste del tipo gaussiano, correspondientes a cada medición.

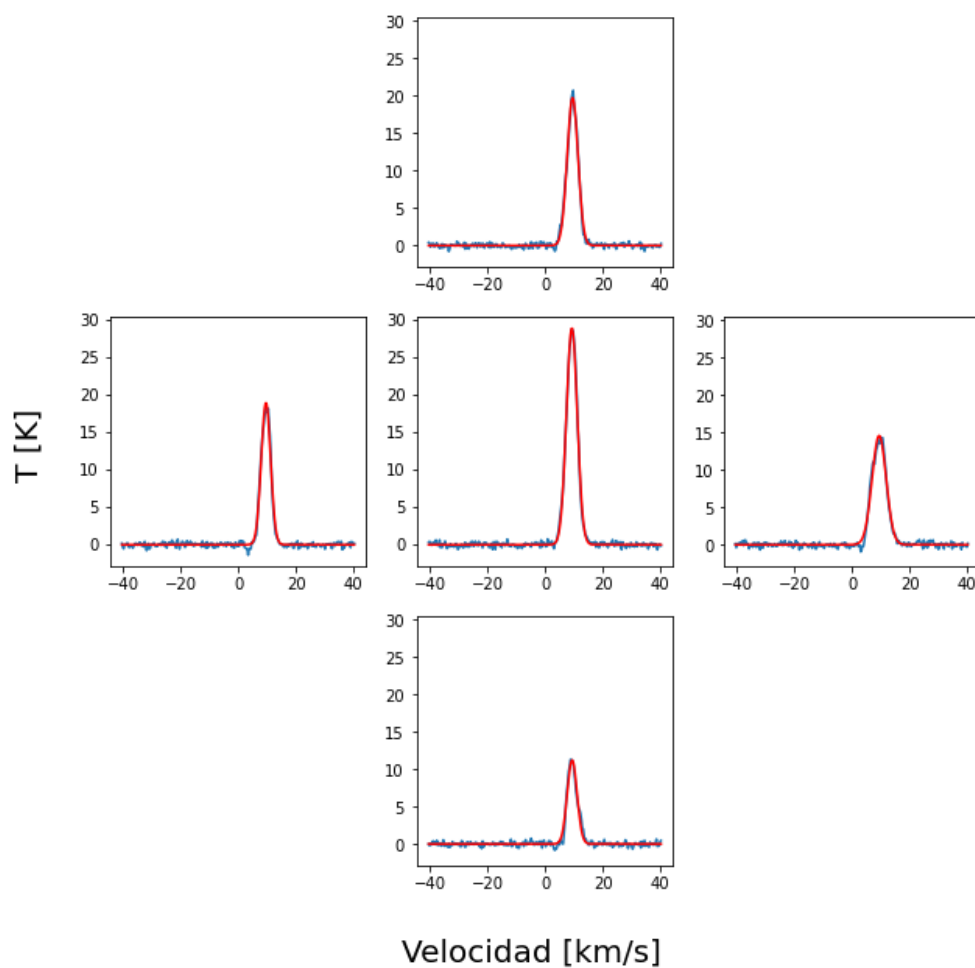


Figura 3: Espectros correspondientes a la *Nebulosa de Orión*, para la primera medición (Azul) y su respectivo ajuste gaussiano (Rojo).

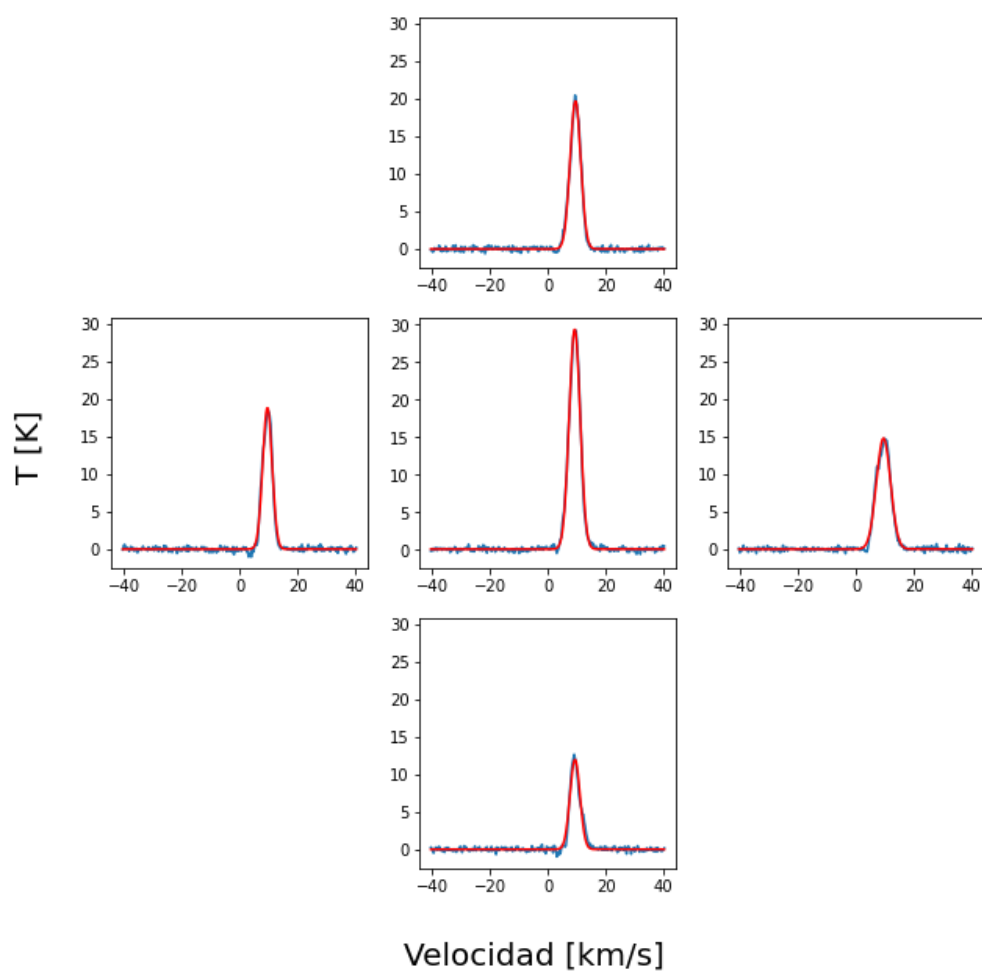


Figura 4: Espectros correspondientes a la *Nebulosa de Orión*, para la segunda medición (Azul) y su respectivo ajuste gaussiano (Rojo).

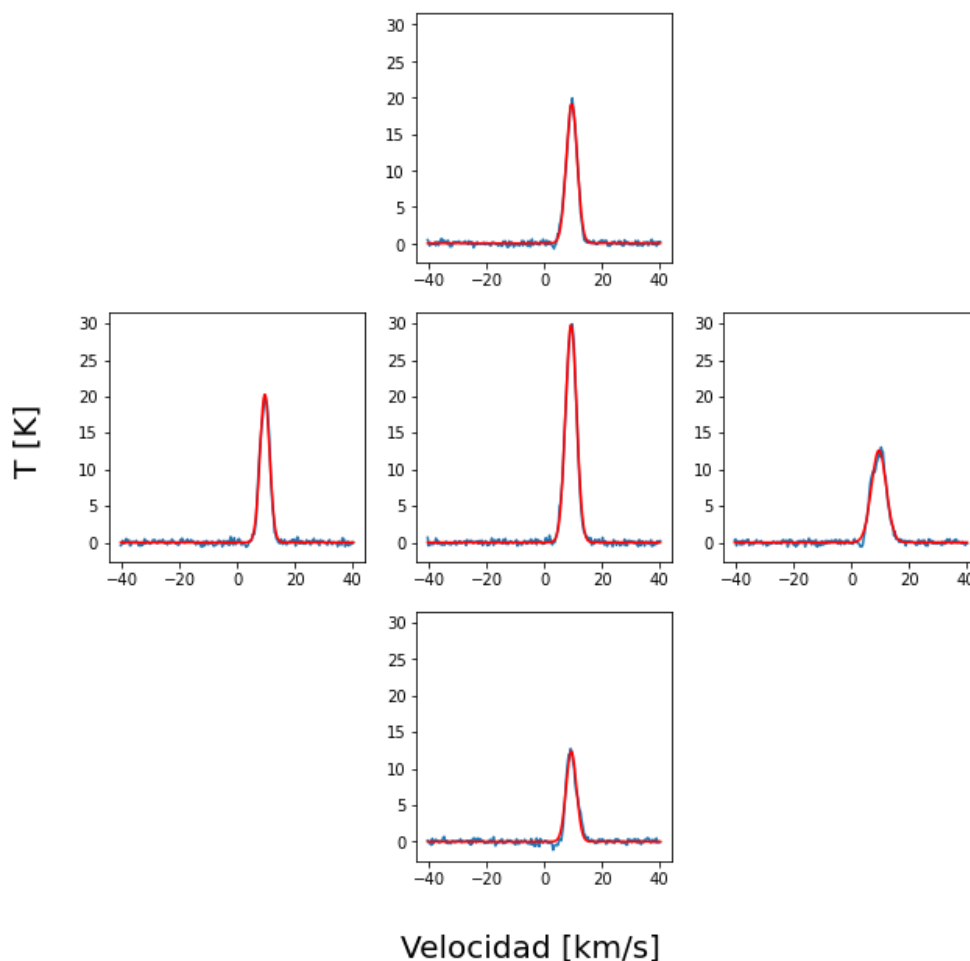


Figura 5: Espectros correspondientes a la *Nebulosa de Orión*, para la tercera medición (Azul) y su respectivo ajuste gaussiano (Rojo).

En las figuras es posible observar que en los alrededores de la línea espectral se alcanza a ver un poco de ruido, es decir, temperaturas que se alejan del ajuste calculado, este ruido es propio de la medición y se debe a pequeñas perturbaciones en el rango de las velocidades observadas.

Se puede observar que el mayor peak de temperatura es logrado por el espectro del punto central, mientras que el resto de temperaturas máximas es levemente menor, esto se relaciona con el *pointing* de la antena.

3.2. *Pointing*

El *pointing* es un concepto que hace referencia al apuntado de la antena. Es necesario evaluar que tan bien se apunta el radio telescopio para saber si los datos que se obtienen son realmente los datos del objeto que se quiere observar. Para evaluar el *pointing* de la antena, se utilizarán las temperaturas máximas de cada espectro en las direcciones vertical y horizontal de la cruz y seguido a eso un ajuste gaussiano. En las tres mediciones se utilizaron las mismas coordenadas para apuntar el telescopio,

por lo que basta con elegir una de las tres mediciones para evaluar el apuntado de la antena. En la Figura 6 se observa el ajuste gaussiano para las temperaturas máximas de los espectros ubicados verticalmente en la cruz y en la Figura 7 para los espectros ubicados horizontalmente, ambos gráficos se realizaron de acuerdo a la tercera medicion.

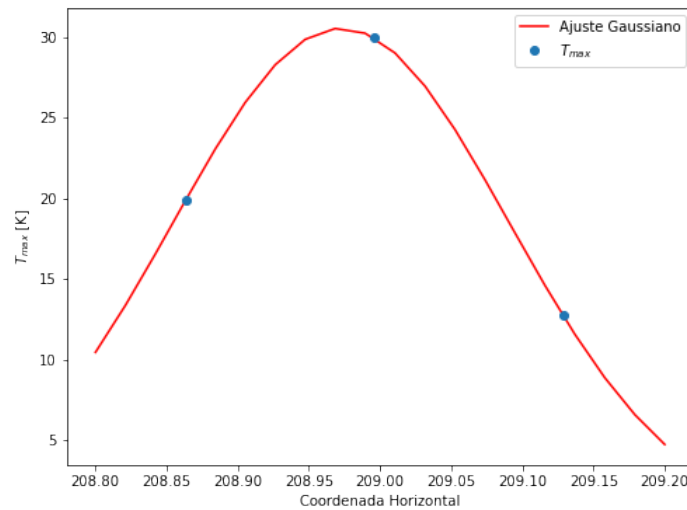


Figura 6: Temperatura máxima de los espectros de acuerdo a la coordenada vertical (cooreenadas galácticas), con su respectivo ajuste gaussiano.

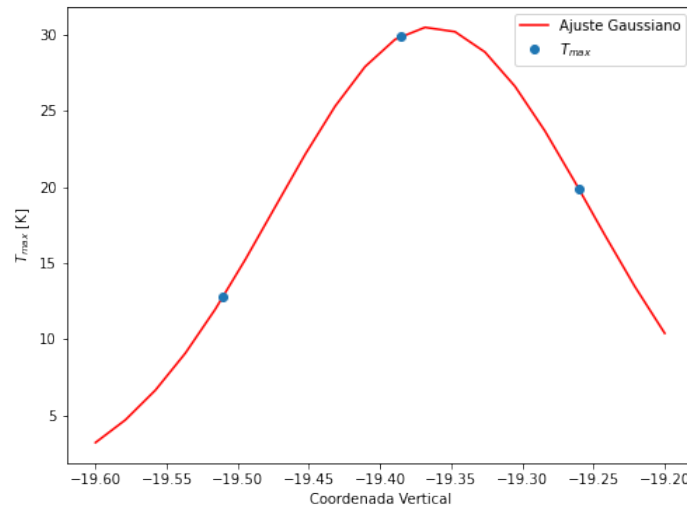


Figura 7: Temperatura máxima de los espectros de acuerdo a la coordenada horizontal (cooreenadas galácticas), con su respectivo ajuste gaussiano.

En la Figura 7 se puede notar que de acuerdo al ajuste gaussiano, la antena esta bien apuntada, ya que la temperatura del espectro central es la mas alta. Sin embargo, podria ser mejor si se apuntara en una coordenada un poco menor, ya que de este modo calzaría perfectamente con el ajuste. Un caso parecido se ve en la Figura 8, en donde se ve que la temperatura máxima vuelve a ser la del espectro central pero en este caso seria mejor si se aumentara un poco esa coordenada. En cualquier caso, para hacer esta evaluación de una manera más profunda se necesitarían mas espectros de los alrededores para poder conseguir un ajuste gaussiano de mayor calidad. De todas maneras, se considera que el *pointing* de la antena fue efectivo.

3.3. Espectro integrado

La intención principal detrás de medir varias veces es disminuir el ruido propio de cada una de las mediciones, para lograrlo se realiza la integración de los espectros, esto se hace utilizando la *Transformada de Fourier* de los espectros. Si se tienen N mediciones de un espectro, cada uno en función de t , estos se pueden integrar con las siguientes dos expresiones:

$$S_n(k) = |\text{fft}(s_n(t))| \quad (11)$$

$$\hat{S}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_n(k) \quad (12)$$

Una vez obtenido $\hat{S}(k)$ se aplica la anti-transformada y se obtiene el espectro integrado. En este caso se debe integrar las tres mediciones para cada posición de la antena, la Figura 8 muestra los espectros integrados con el ajuste gaussiano respectivo.

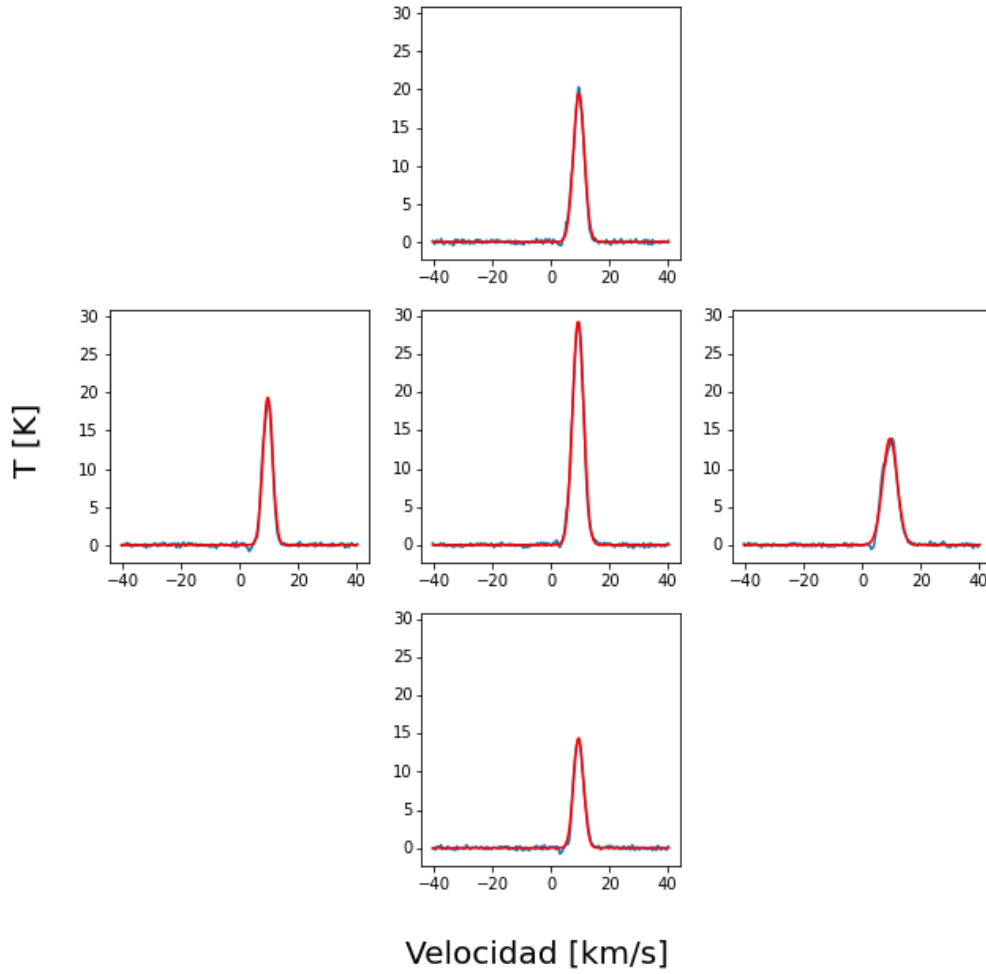


Figura 8: Espectros integrados luego de tres mediciones (Azul), con su ajuste gaussiano (Rojo).

El ajuste gaussiano entrega valores para la desviación estandar (σ) y para la media (μ) y el valor la genera (V_0). Se considera ruido a todos los valores de temperatura para las velocidades sobre $V_0 + 5\mu$ y las menores de a $V_0 - 5\mu$, es decir será ruido todo lo que se aleje más de 5μ del valor V_0 . El error cuadrático medio será calculado como:

$$T_{RMS} = \sqrt{\frac{T_0^2 + T_1^2 + T_2^2 + \dots + T_N^2}{n}} \quad (13)$$

En donde $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ son los valores de temperatura de todos los V que se consideran ruido, T_{RMS} es el error cuadrático medio.

El promedio del error RMS obtenido para el primer espectro (ubicado en la posición superior de la cruz) según la cantidad de mediciones se observa en la Figura 9.

Número de Mediciones Integradas (N)	T_{RMS} [K]
1	0.261
2	0.180
3	0.148

Figura 9: Error cuadrático medio luego de integrar el primer espectro con N mediciones.

Es posible notar que el error cuadrático medio disminuye de acuerdo a la relación empírica:

$$\frac{T_{RMS}(N)}{T_{RMS}(1)} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (14)$$

4. Conclusiones

Este estudio reveló que la calibración del radio telescopio es un procedimiento esencial para obtener datos precisos de un objeto astronómico. La calibración se hace mediante el *Hot Call Test*, que entrega mediciones del ruido asociado al receptor del telescopio y a través del *Antenna Dipping* que determinará el aporte de la atmósfera a las observaciones. Estos procesos están optimizados por el mismo software del telescopio, que obtiene parámetros más precisos y que se debe ajustar periódicamente.

La obtención de un espectro es un proceso que necesita un buen apuntado de la antena, para poder obtener datos más cercanos a lo que sería el objeto en cuestión, a pesar de ello, los espectros observados tienen un ruido asociado, que los diferencia de los espectros ideales estudiados teóricamente. Este ruido se puede disminuir realizando sucesivas mediciones del espectro e integrandolas. Sin embargo, aplicado en la práctica no siempre es posible maximizar el número de mediciones ya que el tiempo de observación para cada campaña es limitado, por lo que se debe asumir que siempre habrá un ruido y debemos conformarnos con minimizarlo de acuerdo a la precisión que requieran las investigaciones que se realicen.

5. Anexos

- [Repositorio con el Código Utilizado](#)