

RECEPTORES CRIOGENICOS PARA RADIOASTRONOMIA

Ings. José Alberto Bava, Jorge Groisman y Aurelio Juan Sanz
Instituto Argentino de Radioastronomía

ABSTRACT

Among the parameters that specify a radio astronomy receiver, two of them take particular importance: Effective Noise Temperature and Gain Stability.

The Effective Noise Temperature (ENT) is determined by the receiver's input stages noise contribution: feeder and low noise amplifiers. It also determines the receiver's sensitivity.

Gain Stability, unlike the ENT, is affected by the inherent stability of the whole receiver's stages.

The present paper makes a review on the fundamentals involved in a receiver with cryogenically cooled stages.

MEJORAS DE RUIDO EN AMPLIFICADORES ENFRIADOS A TEMPERATURAS CRIOGENICAS

En los receptores donde la señal detectada es débil, uno de los parámetros más importantes que caracterizan al sistema, es la temperatura efectiva de ruido. Un amplificador perfecto amplifica tanto la señal como el ruido de entrada, pero un amplificador real, agrega ruido degradando la relación señal/ruido.

El ruido que deteriora a la señal de entrada se puede determinar con la expresión de potencia de ruido térmico:

$$P_n = K T_{\text{e}} B \quad (1)$$

K = constante de Boltzman

B = ancho de banda

T_{e} = Temperatura de ruido del sistema

Siendo la temperatura de ruido del sistema, en el caso de un radiotelescopio, la suma de la temperatura de antena (T_{ant}) más la temperatura equivalente del receptor ($T_{\text{eq. recep.}}$).

La ecuación general de la temperatura de ruido total de n etapas en cascada (que en nuestro caso serán las distintas etapas del receptor) está dada por:

$$T_{eq. \text{ recep.}} = T_1 + T_2/G_1 + T_3/(G_1.G_2) + \dots + T_n/(G_1 \dots G_{n-1}) \quad (2)$$

de donde se desprende que las características de ruido y ganancia de las primeras etapas son de vital importancia para determinar el ruido del sistema.

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA FISICA

La temperatura equivalente de ruido de un componente pasivo está directamente vinculada con la temperatura física del mismo. Para un atenuador, por ejemplo:

$$T_{eq. \text{ aten.}} = (L - 1) T \quad (3)$$

L = atenuación (expresada en veces)

T = temperatura física del atenuador (K)

En este caso particular, la temperatura equivalente de ruido es directamente proporcional a la temperatura física.

En los elementos activos sucede un fenómeno similar. Trabajos realizados sobre el tema, han demostrado que el comportamiento de los transistores de silicio a bajas temperaturas no es bueno, pues su ganancia decrece notablemente. En cambio, los transistores de efecto de campo (FET), además de mejorar sus características de ruido, aumentan su ganancia.

Cuando la impedancia es compleja, la temperatura de ruido de un FET está dada por:

$$T_{eq. \text{ FET}} = \frac{2 f T}{f_t} \sqrt{k_g G_m r_n} + \frac{T G_n}{R} [(R - R_{op})^2 + (X - X_{op})^2] \quad (4)$$

G_n = conductancia de ruido

R = resistencia del circuito adaptador

R_{op} = resistencia óptima de ruido

X = reactancia del circuito adaptador

X_{op} = reactancia óptima de ruido

f_t = frecuencia de transición

f = frecuencia de operación (Ghz)

T = 290K independiente de la temperatura ambiente

k_g = representa la corriente de ruido en la compuerta proporcional a la temperatura ambiente (sin unidad)

G_m = transconductancia (practicamente invariable con la temperatura, registrando un leve aumento al disminuir ésta -mho-)

r_n = resistencia de ruido, proporcional a la temperatura ambiente (ohm)

Puede entonces apreciarse la influencia de la temperatura ambiente en el término que está afectado por la raíz cuadrada, para la determinación de $T_{eq.FET}$ y también observar que debido a la variación del término G_m con la temperatura, debe aumentar la ganancia del elemento.

Una forma de evaluar la mejora es comparando la relación señal/ruido del receptor (C/N) con etapas a temperatura ambiente y etapas enfriadas.

Se define el Factor de Mejora M como:

$$M = (C/N)_{T_{enf}} / (C/N)_{T_{amb}} = N_{T_{amb}} / N_{T_{enf}} \quad (5)$$
$$= K T_{sist} T_{amb} B / K T_{sist} T_{enf} B$$

Luego:

$$M = T_{sist} T_{amb} / T_{sist} T_{enf} \quad (6)$$

Resultando el factor de mejora M (de la relación señal/ruido) como la relación de la temperatura de sistema en ambos casos. El siguiente es un cálculo que ejemplifica, con cierta aproximación, los objetivos propuestos en este proyecto. Se dispone de una antena cuya $T_{ant} = 25K$ y la temperatura del receptor asociado (con amplificadores FET) a temperatura ambiente es $T_{eq. recep.} = 55K$, mientras que con amplificadores FET enfriados a 15K es de unos 25K. Aplicando la ecuación (6) tendremos:

$$M = (25K + 55K) / (25K + 25K) = 1,6 \text{ veces o } 2 \text{ dB}$$

Siendo ese valor, el aumento de la relación señal/ruido del sistema que deseabamos mejorar.

AMPLIFICADOR ENFRIADO A 15 K

Para lograr temperaturas criogénicas se utilizó un equipo refrigerador CTI modelo 22C.

El sistema consta de una unidad compresora y un cabezal enfriador. La unidad compresora tiene por objetivo producir la circulación del gas refrigerante, que en este caso es helio. El cabezal enfriador es la fuente de temperatura criogénica propiamente dicha. Posee la particularidad de operar en cualquier posición sin detrimento en su desempeño. Esta característica es indispensable en la presente aplicación, puesto que el amplificador a enfriar es colocado en el foco de

un reflector parabólico que posee movimientos en torno a dos ejes.

La columna cilíndrica del cabezal enfriador tiene dos etapas de enfriamiento: la superior de 77K y 5W de capacidad de disipación, y la inferior de 15K y 1W de disipación (Fig. 1).

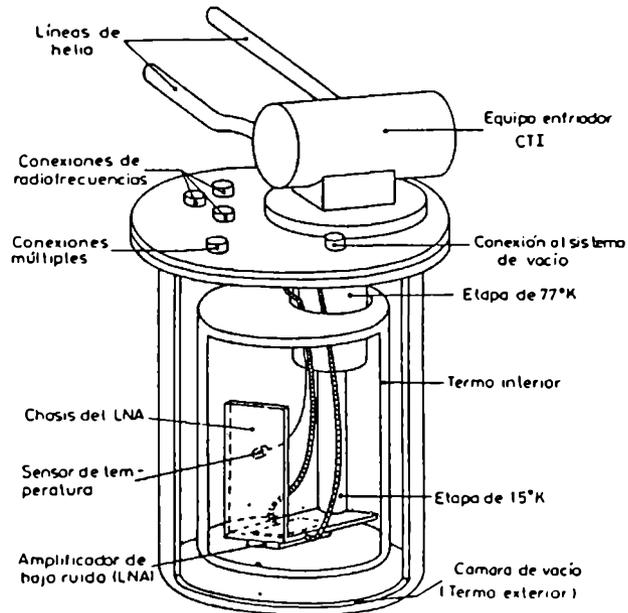


Figura 1 Esquema general del crióstato

Como puede apreciarse en la figura, las etapas del cabezal enfriador (también llamadas estaciones frías) se hallan ubicadas dentro de un recipiente cilíndrico de acero inoxidable (Termo exterior), dentro del cual se practica vacío (que llega hasta 10^{-10} Tor). En su interior se encuentra un termo de cobre, rodeando la etapa de 15K, adosado termicamente a la estación de 77K. Este montaje lo hace funcionar como pantalla contra la radiación térmica, que se produce entre la cara que está a temperatura ambiente y la zona de más baja temperatura.

El amplificador está montado sobre una placa termicamente conductora (cobre), adosada a la estación de menor temperatura. El objetivo de esta disposición es lograr la temperatura más baja posible en la zona de 15K y por consiguiente en el amplificador. Es por eso que deban disminuirse las pérdidas térmicas en la mayor medida posible, para aprovechar así toda la capacidad disipativa de la cabeza, en enfriar el amplificador. De esta manera, las pérdidas por convección, se disminuyeron con

un buen vacío. Las de radiación, mediante una pantalla conectada a la etapa de 77K, rodeando la etapa de 15K. Por último, las pérdidas por conducción, que son producidas principalmente por los cables de entrada y salida de señal así como por los de alimentación, se disminuyeron mediante la creación de "masas térmicas" solidarias a las etapas de 77K y de 15K.

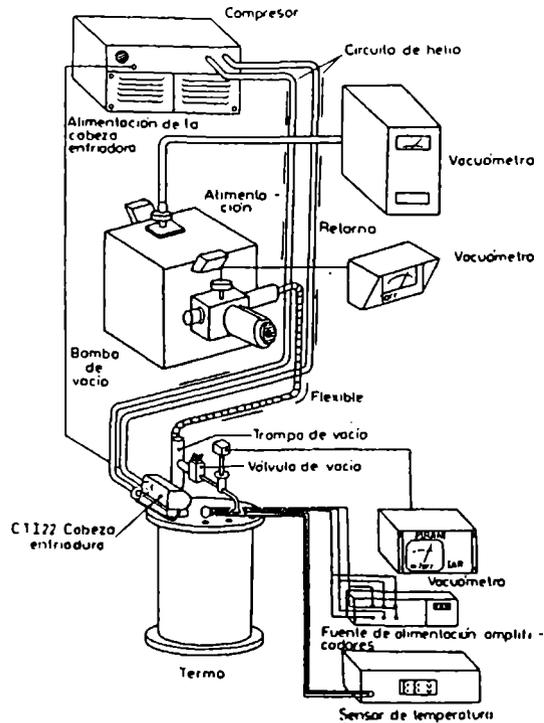


Figura 2 Diagrama completo de instalación del amplificador

RECEPTOR POLARIMETRO CRIOGENICO 18/21 cm

El receptor que se describe a continuación, constituye otro ejemplo de sistemas criogénicos.

Fue construido en el Max-Planck-Institut für Radioastronomie de Bonn, Alemania Federal, como parte de un convenio de cooperación científica entre ambos países, para ser instalado en el Instituto Argentino de Radioastronomía. En las tareas participaron profesionales de ambas instituciones.

Por tratarse de un polarímetro, cuenta con dos canales simétricos para procesar cada una de las polarizaciones recibidas (PCI = polarización circular izquierda, PCD = idem derecha), tal como lo muestra el diagrama de bloques de la figura 3.

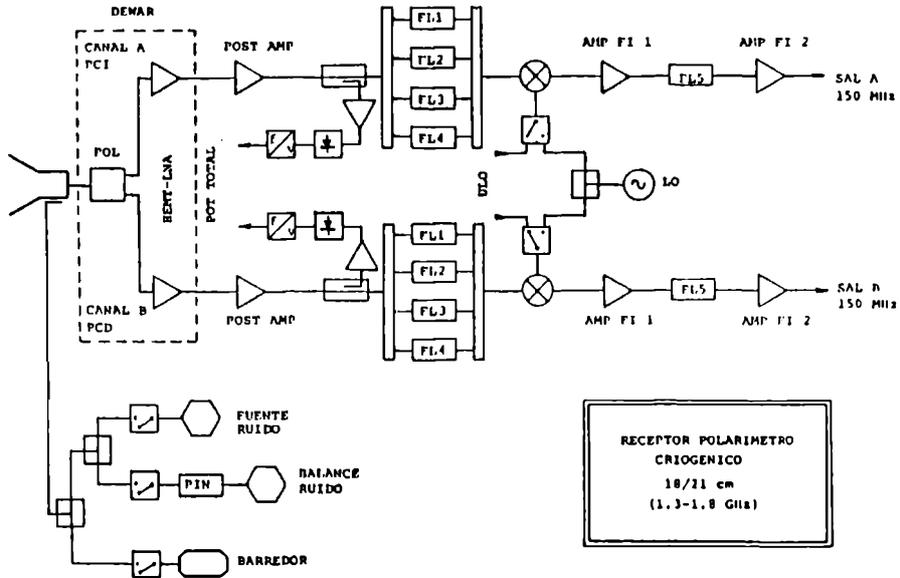


Fig. 3 Diagrama de bloques del receptor de 18/21 cm

Puede observarse, comenzando por el lado izquierdo del diagrama, el alimentador, constituido por una bocina cilíndrica corrugada.

A continuación de éste se encuentra la guía de onda que lo conecta al separador de polarizaciones. A través de ésta se inyectan, mediante una sonda especial, las señales de calibración originadas en la etapa correspondiente.

A la guía de onda le sigue el separador de polarizaciones, que está alojado en el recipiente criostático (Dewar). La continuidad electromagnética entre ambas etapas se consigue mediante una ventana de vacío. Ella está construida con un material que resulta transparente para la señal entrante, siendo a la vez mecánicamente capaz de soportar, la diferencia de presión establecida entre el interior y exterior del dewar.

El separador de polarizaciones está formado por la combinación de un Transductor Ortomodo y un acoplador híbrido de 3 dB.

Los amplificadores de bajo ruido (LNA) emplean transistores HEMT (High-Electron-Mobility Transistor), alcanzando temperaturas de ruido equivalente, tan bajas como 3K en 1425 MHz y ganancia asociada mayor a 32 dB, tal como lo muestra el gráfico de la figura 4. Se tiene allí una representación de Temperatura Equivalente de Ruido versus Frecuencia, en forma paramétrica con la temperatura ambiente, siendo éste una buena muestra del

efecto térmico en el comportamiento de los amplificadores. Aplicando la definición de Factor de Mejora (ec. 6), se verifica que a 1425 MHz resulta $M = 12$ veces. Vale recordar que tanto los LNA como el separador de polarizaciones se encuentran dentro del dewar y por ende a temperatura ambiente que, en la posición de los LNA, alcanza los 21K. Esta es una de las diferencias con el ejemplo presentado antes, en el que solo se enfriaba el LNA.

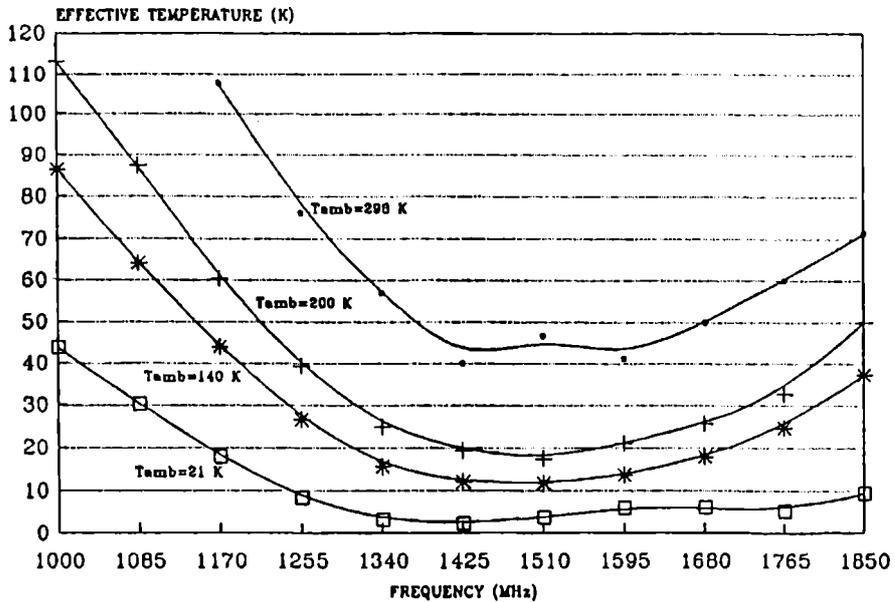


Figura 4 Temperatura Efectiva de Ruido del LNA (canal A)

La etapa siguiente a los LNA está constituida por amplificadores de respuesta plana que se ubican a la entrada del banco de filtros. El banco permite seleccionar en forma remota, el filtro pasabanda adecuado a la porción de espectro que se desea observar (filtro para observaciones de H1, OH y de banda ancha). De la señal presente a la entrada del banco de filtros, se toma una muestra mediante un acoplador direccional. Dicha señal, luego de detectarse, es convertida en frecuencia y enviada a la sala de control para observaciones de Potencia Total.

La etapa convertora está formada por un mezclador doble balanceado, amplificadores de frecuencia intermedia (150 MHz), filtros pasabanda y amplificadores de salida.

La señal de oscilador local es aplicada al mezclador a través de llaves coaxiales que permiten seleccionar la señal proveniente del oscilador local patrón (ULO) ó del oscilador local auxiliar

ubicado en el mismo receptor. Esta configuración tiene por finalidad facilitar las tareas de mantenimiento del equipo. Las señales de calibración (que se inyectan en la guía de onda) son generadas a partir de diodos de ruido, para el caso de la calibración propiamente dicha, y es posible seleccionar su nivel. En la misma etapa se genera una señal de barrido, cuya finalidad es la verificación general del funcionamiento del receptor. Una vista en corte del sistema puede verse en la figura 5. Allí se aprecia la ubicación de componentes en el dewar: ventana de vacío, OMT, híbrido y LNA, así como la cabeza enfriadora. Los restantes componentes electrónicos han sido montados en tres placas metálicas, que son instaladas alrededor del dewar; por razones de claridad no aparecen en la vista. El alimentador y la guía de onda se encuentran en la parte superior del mismo. La sonda de inyección de señales de calibración, se ubica en la cara posterior a la vista mostrada. Tanto el dewar como la guía de onda y el alimentador, fueron construidos en aleación de aluminio.

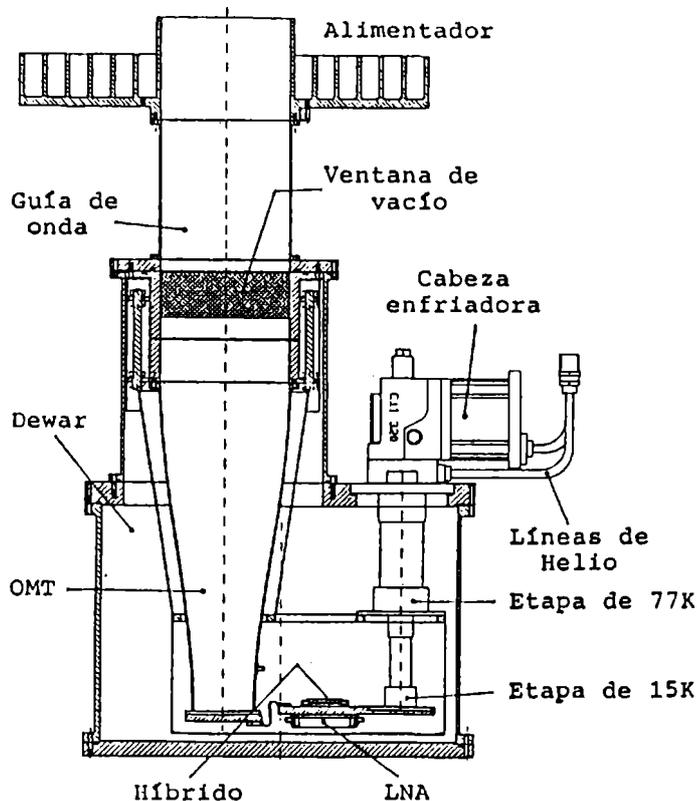


Figura 5 Vista en corte del receptor de 18/21 cm