

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES**



## **TESIS DOCTORAL**

# **Amplificadores de Banda Ancha y Bajo Ruido Basados en Tecnología de GaAs para Aplicaciones de Radiometría**

**Autor: Beatriz Aja Abelán**

**Directores: M<sup>a</sup> Luisa de la Fuente Rodríguez  
Eduardo Artal Latorre**

**Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cantabria para la obtención  
del título de Doctora por la Universidad de Cantabria**

**Santander, Octubre de 2006**

## Capítulo 2

# Principios de Radiometría – La Misión Planck

### 2.1. Introducción

La radioastronomía es una rama de la ciencia, que trata de observar señales de radio provenientes de fuentes cósmicas, y abarca muchos campos, desde fenómenos físicos, hasta el diseño de antenas y receptores. Nació en el año 1932 cuando el ingeniero estadounidense K.G. Jansky, mientras trabajaba en Bell Laboratorios, descubrió perturbaciones eléctricas provenientes de la región cercana del centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea, durante un experimento para localizar fuentes lejanas de interferencias de radio terrestres [16]. A finales del siglo XIX se llevaron a cabo intentos infructuosos para detectar la radioemisión celeste. La distribución de esta radioemisión galáctica fue cartografiada por el ingeniero estadounidense Grote Reber, utilizando un paraboloide de 9,5 m que construyó en su patio de Wheaton, Illinois. En 1943 Reber también descubrió la radioemisión del Sol. A finales de los años 40, George Gamov, Ralph Alpher y Robert Herman desarrollan la teoría del “Big Bang” y se predice una radiación uniforme, equivalente a un cuerpo negro a 5 Kelvin. La radioemisión solar había sido detectada pocos años antes, cuando fuertes estallidos solares produjeron interferencias en los sistemas de radar británicos, estadounidenses y alemanes, diseñados para detectar aviones. Como resultado de los grandes progresos realizados durante la II Guerra Mundial en antenas de radio y receptores sensibles, la radioastronomía floreció en la década de 1950. Los científicos adaptaron las técnicas de radar utilizadas en época de guerra para construir diversos radiotelescopios en Australia, Gran Bretaña, Países Bajos, Estados Unidos y la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, y muy pronto se despertó el interés de los astrónomos profesionales.

John Kraus después de la II Guerra Mundial empezó a trabajar en el observatorio de la Universidad de Ohaio y escribió un libro de texto de radioastronomía, "Radio Astronomy," publicado en 1966 [17], que es aún una guía imprescindible para los radioastrónomos. Además Kraus diseñó el “Big Ear”, similar a un telescopio reflector, a finales del los 50, con la ayuda de estudiantes.

Un gran número de fuentes de radioemisión discretas fueron catalogadas, y desde la década de los años cincuenta, fueron identificadas muchas radiofuentes como galaxias visibles distantes. En 1963, una continuada investigación llevó al descubrimiento de radiofuentes casi estelares llamadas cuántares, que debido a que presentaban desplazamientos hacia el rojo de una magnitud sin precedentes, parecían encontrarse a distancias enormes de la Tierra. Poco después, en 1965, los radioastrónomos estadounidenses Arno Penzias y Robert W. Wilson anunciaron el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas cósmica de 3 K (-270 °C), que tiene muchas implicaciones para las teorías del origen del Universo y su evolución (Big bang). En 1968 se descubrió un tipo nuevo de radiofuente, el púlsar, identificado rápidamente como una estrella de neutrones que gira a gran velocidad. A esta lista incompleta se pueden añadir descubrimientos relativamente recientes como la existencia de los agujeros negros, la radiación de onda

gravitacional, detalles del nacimiento de estrellas y otros sistemas solares, y el descubrimiento de la anisotropía del fondo cósmico de microondas, que mide directamente la estructura temprana del Universo.

Nuevos desarrollos en la tecnología de microondas han hecho posible la creación de instrumentos más sensibles y complejos, los cuales en los últimos cincuenta años, han permitido realizar descubrimientos sobre el sistema solar, otros sistemas solares, el medio interestelar, galaxias, y la evolución del universo.

## 2.2. Principios de radiometría

### 2.2.1. Descripción general de un radiómetro

Un radiómetro es un receptor muy sensible diseñado para medir la emisión electromagnética de un cuerpo. El nivel de potencia de la señal en receptores radiométricos es generalmente bastante pequeña, así que sensibilidad y estabilidad altas, son requerimientos importantes para este tipo de receptores [17]-[19]. El problema más importante en radiometría, es establecer la temperatura de la fuente más baja detectable. La temperatura mínima detectable está generalmente determinada por las fluctuaciones de ruido que aparecen a la salida del receptor. Como la fuente está generando una señal de tipo ruido térmico, se deben emplear técnicas especiales para reducir las fluctuaciones espurias en la salida producidas por los circuitos del receptor, y para diferenciarlas de la señal real.

Los elementos básicos que forman un radiómetro son una antena, amplificadores de bajo ruido y banda ancha, un filtro paso banda, un detector cuadrático, un filtro paso bajo que actúa como integrador y un sistema de adquisición de datos para procesar las señales.

Si definimos la potencia enviada por la antena a un receptor como  $P_A = kT_A \cdot B$ , (donde  $k$  es la constante de Boltzmann  $1.38 \cdot 10^{-23}$  Julio/K,  $B$  es el ancho de banda), se podría decir que la función del radiómetro es medir  $T_A$ , donde  $T_A$  se define como la temperatura radiométrica de la antena.

Conceptualmente, la función de transferencia del radiómetro se representa midiendo la tensión de la salida en función de la temperatura de ruido de una fuente de ruido conectada al terminal de entrada en lugar de la antena.

La sensibilidad radiométrica [17] en temperatura ( $\Delta T$ ) o la precisión con la que podemos medir  $T_A$ , se define como el mínimo cambio de temperatura de la antena,  $T_A$ , que se puede detectar en la salida del radiómetro. Depende del ruido térmico, del ancho de banda de radiofrecuencia y del ancho de banda de video.  $\Delta T$  es lo que caracteriza la calidad de un radiómetro de microondas y se calcula según (2.1).

$$\Delta T = \frac{T_{sys}}{\sqrt{B\tau}} \quad (2.1)$$

Donde,  $\Delta T$  (Kelvin) es la sensibilidad del radiómetro,  $T_{sys}$  (Kelvin) es la temperatura de ruido del sistema que realiza la medida y es la suma de la temperatura de ruido de la antena y la temperatura de ruido del receptor. La constante  $\tau$  (seg) es el tiempo de integración del filtro paso bajo del receptor en segundos y es inversamente proporcional al ancho de banda de video. El valor  $B$  (Hz) es el ancho de banda efectivo en radiofrecuencia antes de detectar la señal.

El cálculo del ancho de banda efectivo de un radiómetro [17], es necesario para conocer la sensibilidad en temperatura detectada del mismo y no suele coincidir con el ancho de banda a 3 dB. La forma de calcular el ancho de banda efectivo de un radiómetro viene descrita por (2.2).

$$B = \frac{\left[ \int_0^\infty G(f) df \right]^2}{\int_0^\infty [G(f)]^2 df} \quad (2.2)$$

Siendo  $G(f)$  la ganancia del receptor en la banda en función de la frecuencia que incluye la ganancia de RF de los amplificadores y los filtros y la ganancia de conversión del detector.

Toda medida de un receptor está afectada por el ruido del propio receptor, por tanto, cuanto mejor aislemos el ruido de la medida deseada, mejor radiómetro obtendremos. Puesto que el ruido no afecta de igual manera a los distintos componentes del radiómetro, no es tarea fácil aislar el ruido de la señal deseada. Distintos métodos para hacer esta operación han llevado a la construcción de diferentes tipos de radiómetros. Algunos

de ellos son: el radiómetro de potencia total, el radiómetro de Dicke, el radiómetro por adición de ruido, el receptor de correlación, o receptores que son híbridos utilizando dos o más técnicas.

## 2.3. Tipos de radiómetros

### 2.3.1. Receptor de potencia total

Cualquier receptor que mide la potencia total de ruido de la antena y el receptor se denomina receptor de potencia total [17], [18]. Su función es detectar y medir emisiones de radio de fuentes. En la mayoría de los casos la emisión consiste en radiación incoherente cuyas propiedades estadísticas no difieren del ruido originado en el propio receptor o de la radiación de fondo acoplada al receptor por la antena. El esquema básico de un receptor de potencia total se muestra en la Figura 2.1.

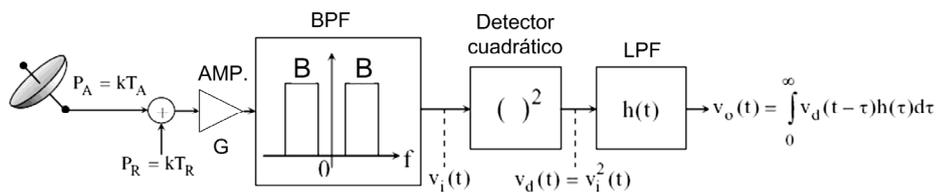


Figura 2.1. Diagrama de bloques de un receptor de potencia total

Este receptor calcula el valor promedio de la tensión dada por un detector cuadrático, proporcional a la potencia de ruido recibida por la antena más la del receptor, después de amplificarla con una ganancia  $G$ , y filtrar con un filtro paso banda de ancho de banda  $B$ . De este modo el radiómetro de potencia total simplemente proporciona el valor de potencia promedio sobre un intervalo, dado por el filtro paso bajo de salida con respuesta al impulso  $h(t)$ .

La densidad espectral de potencia entrando por la antena ( $P_A$ ) es  $kT_A$  Watt/Hertz, donde  $T_A$  es la temperatura de la antena, y es el parámetro que se desea medir. El ruido gaussiano ( $P_R$ ) añadido por el receptor, debido al ruido térmico y al ruido shot viene dado por  $kT_R$  Watt/Hertz. La suma  $k(T_A+T_R)$  es amplificada y pasa a través del filtro paso banda de anchura  $B$  (Hz).

La forma de onda de las tensiones, y los espectros de potencia correspondientes en varios puntos entre la entrada de la antena y la salida final se representan en la Figura 2.2. La forma de onda de la tensión de salida del filtro paso banda es  $v_i(t)$ , y la tensión detectada, a la salida del detector cuadrático,  $v_d(t)$ . La señal de salida  $v_o(t)$  del radiómetro es la de salida del filtro paso bajo, caracterizado por su respuesta al impulso  $h(t)$ , con un ancho de banda  $B_{LF}$ .

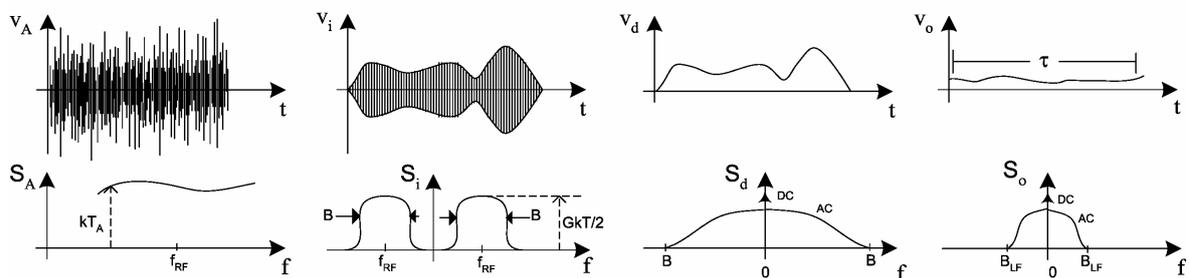


Figura 2.2. Señales en el tiempo y espectros de potencia en un receptor de potencia total

La sensibilidad del radiómetro de potencia total, se obtiene evaluando la tensión eficaz a la salida ( $v_{orms}$ ), debido a las fluctuaciones de salida del ruido del sistema, expresándola en Kelvin, e igualándola a la componente de continua de salida, que es proporcional a la temperatura de la antena más la del receptor:  $(T_A+T_R)$ .

La tensión  $v_{orms}$ , se obtiene de la componente de AC de la densidad espectral de potencia de la tensión de salida,  $S_o(f)$ . El valor medio de la tensión de salida  $v_o$ , es la componente de continua de  $S_o(f)$ . La tensión a la salida del detector,  $v_d(t)$ , no es una señal aleatoria gaussiana, pero en cambio las tensiones a su entrada  $v_i(t)$  y

### 2.3. Tipos de radiómetros

$v_i(t-\tau)$  son variables aleatorias gaussianas con media cero (JGRVZM: Jointly Gaussian Random Variables with Zero Mean), y se puede aplicar la propiedad del valor esperado de la expresión (2.3). En primer lugar se evalúa la función de autocorrelación a la salida del detector,  $R_d(\tau)$ , (2.4).

$$E[xyzw] = E[xy]E[zw] + E[xz]E[yw] + E[xw]E[yz] \quad (2.3)$$

$$R_d(\tau) = E[v_i^2(t) \cdot v_i^2(t-\tau)] = \overline{v_i^2(t)} \cdot \overline{v_i^2(t-\tau)} + 2\overline{(v_i^2(t) \cdot v_i^2(t-\tau))} = R_i^2(0) + 2R_i^2(\tau) \quad (2.4)$$

Aplicando la transformada de Fourier, se obtiene la densidad espectral de potencia a la salida del detector, (2.5).

$$S_d(f) = R_i^2(0) \cdot \delta(f) + 2S_i(f) * S_i^*(f) \quad (2.5)$$

La autocorrelación de la señal de entrada al detector en el cero,  $R_i(0)$ , es su valor de potencia media, debida al ruido de banda ancha. Esto es, la potencia de salida de la sección de predetección viene dada por (2.6).

$$R_i(0) = \overline{v_i^2(t)} = kG(T_{sys} + \Delta T)B \quad (2.6)$$

La temperatura del sistema es  $T_{sys}$  y  $\Delta T$  es la temperatura de ruido de la señal o el cambio de temperatura a medir de la antena. En la sección de predetección se amplifica con una ganancia  $G$  y se filtra en un ancho de banda  $B$ . El valor medio de continua de la tensión de salida del detector cuadrático,  $v_d$ , (2.7), es proporcional a la potencia de la señal de entrada,  $v_i$ .

$$\overline{v_d(t)} = \alpha \cdot \overline{v_i^2(t)} \quad (2.7)$$

Donde  $\alpha$  es la constante de sensibilidad del detector. Por lo tanto la tensión de salida de DC, es proporcional a la potencia de entrada de acuerdo a (2.8).

$$V_{DC} = \alpha kG(T_{sys} + \Delta T)B \quad (2.8)$$

La potencia de continua a la salida del detector viene dada por (2.9).

$$V_{DC}^2 = \alpha^2 \cdot R_i^2(0) = (\alpha kG(T_{sys} + \Delta T)B)^2 \quad (2.9)$$

El espectro de potencia a la salida del detector se muestra en la Figura 2.3, donde se supone que en la parte de predetección la banda de paso tiene una forma cuadrada de anchura  $B$ , centrada en la frecuencia  $f_0$ .

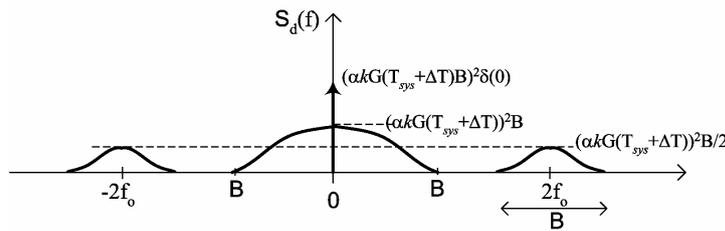


Figura 2.3. Espectro de potencia a la salida del detector

La potencia de la señal continua a la salida debida a la señal de interés viene dada por (2.10).

$$P' = (\alpha kG\Delta T B)^2 \quad (2.10)$$

Y la densidad de potencia debida a la componente AC de baja frecuencia, es igual a la expresada en (2.11).

$$S_{LF} = 2(\alpha kGT_{sys})^2 B \quad (2.11)$$

La tensión de salida del detector alimenta al integrador a través de un filtro paso bajo para suavizar la señal reduciendo fluctuaciones de ruido. La señal a la salida de todo el radiómetro  $v_o(t)$ , es la convolución de la señal detectada con la respuesta al impulso,  $h(t)$  del filtro. El efecto del filtro paso-bajo se obtiene generalmente por una constante de tiempo larga (orden de segundos) con un circuito integrador RC de modo

que el ancho de banda equivalente de ruido del filtro paso-bajo,  $B_{LF}$ , es mucho más pequeño que el ancho de banda de la sección de predetección,  $B$ . Si el filtro paso bajo tiene una banda de paso rectangular con un ancho de banda equivalente de ruido  $B_{LF}$ , la potencia de la señal a la salida debida las fluctuaciones viene dada por (2.12).

$$P_{LF} = 2(\alpha kGT_{sys})^2 B \cdot B_{LF} \quad (2.12)$$

La sensibilidad o mínima señal detectable  $\Delta T_{min}$ , (2.13), en Kelvin, del radiómetro se define como la temperatura de ruido de la señal  $\Delta T$  que produce una potencia de salida DC del detector  $P'$ , igual a la potencia de salida debida al ruido  $P_{LF}$ , es decir es cuando el valor de tensión continua es igual al valor eficaz de las fluctuaciones de salida debidas al ruido del sistema.

$$\Delta T_{min} = T_{sys} \sqrt{\frac{2B_{LF}}{B}} \quad (2.13)$$

Para un filtro paso bajo de ancho de banda equivalente de ruido  $B_{LF}$ , el tiempo de integración equivalente,  $\tau$  [17], viene dado por (2.14). Y la sensibilidad radiométrica, se puede expresar como (2.15).

$$\tau = \frac{1}{2B_{LF}} \quad (2.14)$$

$$\Delta T_{min} = \frac{T_{sys}}{\sqrt{B\tau}} \quad (2.15)$$

### 2.3.2. Sensibilidad con inestabilidades

#### a) *Ruido 1/f*

El origen de esta señal aleatoria, de enorme interés por su ubicuidad y propiedades matemáticas, es una señal ruidosa, desordenada, que no se repite nunca del mismo modo y, sin embargo, posee características estadísticas que permiten clasificarla.

Dentro de la definición de ruido, podemos diferenciar el ruido blanco del ruido “de color”. En el ruido blanco se hallan presentes por igual todas las componentes en las diversas frecuencias, al igual que en la luz blanca todos los colores se encuentran con igual intensidad.

Cuando filtramos el ruido blanco, obtenemos un ruido que ya no es blanco, sino “de color”. El ruido gaussiano queda plenamente caracterizado mediante su densidad espectral o espectro de potencia, una función que muestra cómo la potencia total de la señal se distribuye entre las distintas componentes de diversa frecuencia. La densidad espectral de ruido blanco es constante, mientras que el espectro del ruido blanco filtrado en paso bajo es una función que decrece cuando aumenta la frecuencia.

Entre los ruidos de color destaca sobre todo el ruido 1/f. En este ruido la potencia correspondiente a una determinada componente de Fourier de frecuencia  $f$  es inversamente proporcional a  $f$ , y la densidad espectral tiene un aspecto sumamente sencillo cuando se la representa en un gráfico doblemente logarítmico, pues se reduce a una recta con pendiente igual a  $-1$ .

El ruido 1/f es estacionario, es decir, en promedio sus características permanecen constantes a lo largo del tiempo.

Es difícil observar experimentalmente densidades espectrales que sean de la forma 1/f. Lo habitual es dar con espectros del tipo  $1/f^a$  con  $0.8 < a < 1.4$ .

No suele evidenciarse un aplanamiento del espectro en bajas frecuencias. Observaciones cuidadosas del ruido 1/f en semiconductores muestran que se extiende hasta las frecuencias más bajas perceptibles en el laboratorio ( $10^{-7}$  Hz).

El problema del ruido 1/f es que la densidad espectral crece indefinidamente cuando la frecuencia tiende a cero.

#### b) *Efecto sobre las prestaciones del radiómetro*

Las fluctuaciones de ganancia y de temperatura de ruido en las etapas amplificadoras del transistor son un punto clave en los receptores de radioastronomía [20], debido a que esta inestabilidad puede ser confundida

### 2.3. Tipos de radiómetros

con las pequeñas señales recibidas por la antena. Esto es así porque la señal se mide durante periodos de tiempo durante los que la ganancia de los amplificadores puede variar, dando lugar a un espectro de ruido  $1/f$ , [21], [22].

Dado que las señales que queremos medir son pequeñas, la aparición del ruido  $1/f$  puede dar lugar a medidas erróneas, por tanto, los receptores tienen que ser lo suficientemente buenos para que el ruido no afecte a las señales deseadas. Cualquier inestabilidad en la respuesta del receptor modulará la señal de salida.

La sensibilidad radiométrica se reduce debido a que las fluctuaciones de ganancia y temperatura de ruido de los amplificadores producen inestabilidades. Las fluctuaciones de ganancia, (2.16), generalmente se deben a pequeñas fluctuaciones térmicas o inestabilidades del semiconductor.

$$g(t) = G(1 + m(t)) \text{ con } |m| \ll 1 \quad (2.16)$$

Como las fluctuaciones de ganancia son independientes del ruido térmico, las varianzas se suman y la sensibilidad es (2.17), con  $\overline{m^2}$  el valor cuadrático medio de las variaciones de ganancia.

$$\Delta T = \sqrt{(\Delta T_{\text{térmico}})^2 + \overline{m^2} T_{\text{sys}}^2} \quad (2.17)$$

Para un radiómetro de ancho de banda efectivo,  $B$ , y temperatura de ruido,  $T_{\text{sys}}$ , con un tiempo de integración,  $\tau$ , la sensibilidad,  $\Delta T$ , viene dada por (2.18).

$$\Delta T = T_{\text{sys}} \cdot \sqrt{1/B\tau + (\Delta G/G)^2} \text{ con } \overline{m^2} = (\Delta G/G)^2 \quad (2.18)$$

Donde  $\Delta G/G$  es la magnitud media de la fluctuación relativa de ganancia con un espectro de frecuencia aproximado  $1/f$ , observada durante el intervalo de integración y que desaparecería para un sistema radiométrico ideal. El ancho de banda efectivo del radiómetro,  $B$ , viene dado por (2.2).

#### 2.3.3. Receptor de Dicke

El receptor de Dicke o de detección síncrona [23], [24], evita la disminución de sensibilidad debida a fluctuaciones de ganancia. Éste fue desarrollado en el laboratorio del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT World War II Radiation Laboratory (EEUU)). El esquema de un radiómetro de Dicke, se muestra en la Figura 2.4. Se trata de un receptor en cuya entrada hay un conmutador, y mide durante un tiempo la señal recibida por la antena, y durante otro tiempo una carga resistiva a temperatura constante. Fue el primero en introducir el uso del principio de modulación, para eliminar las inestabilidades del receptor. El conmutador opera a una frecuencia más alta que aquella a la cual ocurren las variaciones de ganancia.

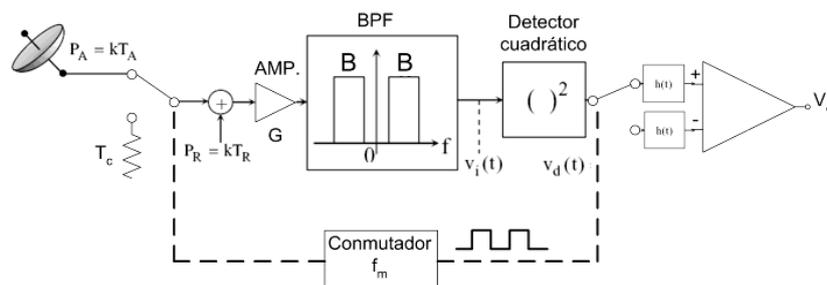


Figura 2.4. Diagrama de bloques de un receptor de Dicke

Cuando el receptor esté conectado a la antena la tensión a la salida es (2.19) y cuando está conectado a la carga (2.20).

$$V_{oA} = \frac{1}{2} \alpha k G (T_A + T_R) B \quad (2.19)$$

$$V_{oC} = \frac{1}{2} \alpha k G (T_C + T_R) B \quad (2.20)$$

$\alpha$  es la constante de sensibilidad del detector,  $G$  la ganancia de radiofrecuencia,  $B$  el ancho de banda,  $T_A$  la temperatura de la antena,  $T_R$  la temperatura del receptor, y  $T_C$  la temperatura de carga de referencia.

La sensibilidad de este tipo de receptores [24], (2.21), depende de la diferencia de temperatura que hay entre la temperatura de la antena y la temperatura de referencia. Las variaciones de ganancia están presentes en la diferencia de temperatura.

$$\Delta T \cong \left[ \frac{4}{B\tau} \frac{1}{2} \left( (T_A + T_R)^2 + (T_C + T_R)^2 \right) + (T_A - T_C) \left( \frac{\Delta G}{G} \right)^2 \right] \quad (2.21)$$

Si las temperaturas de la antena y de la carga son iguales, las fluctuaciones de ganancia desaparecen y no hay señal a la salida,  $V_{oA}$  es igual a  $V_{oC}$ . La sensibilidad del receptor está determinada por el ruido del sistema, y como la señal sólo se recibe la mitad del tiempo, la sensibilidad es la mitad de la de un receptor de potencia total, (2.22).

$$\Delta T = \frac{2T_{sys}}{\sqrt{B\tau}} \quad (2.22)$$

El ancho de banda del filtro paso bajo, debe de ser al menos diez veces la frecuencia de conmutación, para incluir todos los armónicos importantes de la señal cuadrada a la salida.

### 2.3.4. Radiómetro de correlación

Un receptor de correlación, [18], [25], [26], está formado por dos receptores acoplados en paralelo a una antena, y se multiplican las señales a la salida de ambos. La salida de la multiplicación únicamente contiene una señal de correlación, o una señal proporcional a la potencia de ruido entrando por la antena, ya que las potencias de ruido que añaden los receptores están incorreladas, y por lo tanto después de la multiplicación no estarán. El radiómetro de correlación permite comparaciones continuas y diferenciación entre dos observaciones independientes, por lo tanto la sensibilidad o la señal mínima detectable se mejora por un factor  $\sqrt{2}$  en comparación con el esquema del radiómetro de Dicke. Respecto a este último tiene la desventaja de tener que hacer dos receptores idénticos,

Con el uso de estas técnicas de correlación, la sensibilidad del radiómetro puede mejorarse mucho, debido al bajo grado de correlación del ruido introducido por cada uno de los receptores. El esquema de un receptor de correlación se muestra en la Figura 2.5.

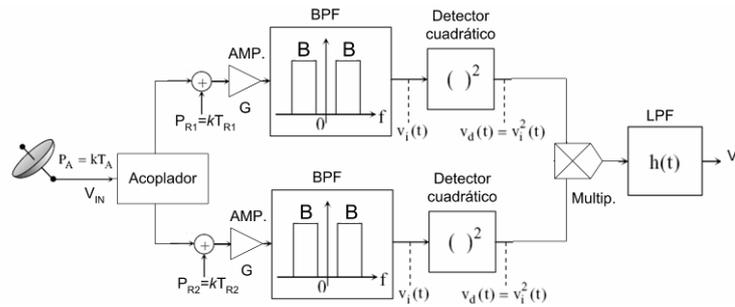


Figura 2.5. Diagrama de bloques de un receptor de correlación

La señal de entrada se divide por dos canales separados, y la densidad espectral de potencia a la entrada de cada canal está dada por (2.23), considerando el espectro en ambos semiejes de frecuencia.

$$S_{in}(f) = \frac{1}{2} k \left( \frac{1}{2} (T_A + \Delta T) + T_R \right) \quad (2.23)$$

La sensibilidad de un radiómetro de correlación sigue la expresión de la (2.24).

$$\Delta T \cong \sqrt{2} \frac{T_{sys}}{\sqrt{B\tau}} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{1/2 T_A}{T_{sys}} \right)^2} \right) \quad (2.24)$$

La temperatura del sistema es  $T_{sys}$  igual a  $1/2 T_A + T_R$ .

Otros tipos de radiómetro de correlación, [25], [27], consisten en dos sistemas receptores con antenas separadas. Ambas antenas reciben de la misma fuente de señal. Las dos señales captadas por la antena están

correladas en tiempo y al multiplicar la salida de los dos receptores, se obtendrá una señal proporcional a la señal de entrada. Aunque ambas señales de entrada son coherentes en amplitud y en fase, después de pasar por los sistemas receptores, en general únicamente las amplitudes de las señales mantienen algún grado de correlación. Por lo tanto, es posible utilizar detección de ley cuadrática, antes de aplicar la correlación, dando lugar al radiómetro de correlación de tipo envolvente, donde sólo las amplitudes son correladas. Cuando la información de fase de las entradas está correlada, las señales son correladas antes de detectar, y este tipo de radiómetro tiene una sensibilidad superior.

Finalmente, hay otros tipos de radiómetros, que son híbridos de dos o más técnicas expuestas anteriormente. El de Graham [28] consiste en dos receptores idénticos de tipo Dicke, que conmutan entre una carga y la antena, de modo que siempre se observa el cielo, cada vez por un receptor, mientras que al mismo tiempo por el otro se mide la carga. A la salida se multiplican las dos salidas de los receptores, y la sensibilidad es igual que en un radiómetro de correlación, al tener dos observaciones independientes. Más radiómetros con combinaciones de diferentes técnicas son presentados en las referencias de [29] a [32].

## 2.4. La misión Planck

La misión científica Planck de la Agencia Europea del Espacio (ESA) [7], [33]-[35], tiene por objetivo la investigación astronómica en el rango de frecuencias milimétricas y submilimétricas. Con esta misión se generarán mapas calibrados de alta sensibilidad de la totalidad del cielo. Así mismo, permitirá caracterizar pequeñas fluctuaciones en la radiación cósmica del fondo de microondas (CMB), que son clave para conocer el origen del Universo. Se trata de la tercera misión espacial, sobre las anisotropías de temperatura del CMB. Las anteriores misiones fueron COBE (Cosmic Microwave Background Explorer) [36] y WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [37], [38]. Los radiómetros de WMAP miden diferencias de temperatura entre dos regiones del cielo muy separadas, mediante un par de telescopios simétricos, en cambio Planck está diseñado para medir diferencias entre la señal del cielo y de una carga interna estable criogénicamente enfriada. Con Planck se espera conseguir una sensibilidad diez veces superior a WMAP, con una resolución angular del doble y cubriendo más bandas de frecuencia.

Esta misión proporcionará una fuente de información relevante para considerables estudios de cosmología y astrofísica y ayudará a los astrónomos a decidir qué teorías sobre el origen y evolución del Universo son correctas y cuáles, por el contrario, deben ser descartadas. Toda esta información se obtendrá observando la radiación cósmica de fondo de microondas (CMB) que tiene su origen poco después del Big Bang, suceso que originó el Universo y que ocurrió hace aproximadamente 15000 millones de años. Esta señal es la más lejana y antigua que un telescopio puede ver hoy en día y, por lo tanto, puede considerarse como una onda resultante del Big Bang. Como mirar atrás en el espacio significa también mirar atrás en el tiempo, observar esta primera energía es como estar viendo el Universo en su origen.

La radiación cósmica de fondo no se originó a partir de un objeto en particular, sino a partir del Universo entero 300.000 años después del Big Bang, cuando ni siquiera las galaxias estaban formadas. Esta radiación es actualmente la primera energía que ha existido libremente en el Universo. Esta es la razón por la cual hoy puede ser detectada en cualquier lugar del cielo. Observar esta señal hoy es como estar viendo el Universo 300.000 años después del Big Bang, por el mismo motivo que observar una galaxia que está a 10.000 millones de años luz es como estar mirándola hace 10.000 millones de años.

Los detectores Planck están diseñados para detectar la radiación de fondo cósmico de microondas midiendo las variaciones de temperatura. Estos receptores serán capaces de distinguir variaciones de alrededor de 1  $\mu$ K. Las ondas electromagnéticas son formas de energía, y la temperatura es una medida de la energía; cuanto mayor es la frecuencia de una onda, mayor energía tiene y más caliente está. Por lo tanto, la energía de microondas puede medirse como temperatura. De hecho, cuando la radiación cósmica de fondo de microondas fue liberada el Universo era mucho más caliente. Por lo tanto, el objetivo de la misión Planck es estudiar el cielo detectando las microondas procedentes del fondo cósmico. Esto es lo mismo que decir que la misión Planck va a medir la temperatura de cada parte del cielo.

Esta temperatura es de alrededor de 2.7 Kelvin. En medidas realizadas se ha obtenido que la temperatura en todo el cielo con tres cifras decimales es de 2.726 K. Este grado de precisión en la medida puede parecer suficiente pero no lo es. Los científicos saben, por observaciones previas, que cuando se mide el cielo de forma más precisa aparecen zonas ligeramente más calientes o más frías (entendiendo por ligeramente 0,00001 grados de diferencia). Estas diferencias de temperatura son las señales dejadas en el CMB por las “semillas” primitivas de las enormes concentraciones actuales de materia: los grupos de galaxias, las galaxias, etc.

La información obtenida con la misión tiene que recoger en un mapa la localización precisa de las regiones ligeramente más calientes y más frías, llamadas por los astrónomos anisotropías.

Como consecuencia, los detectores Planck tienen que ser muy sensibles y trabajar en temperaturas muy cercanas al cero absoluto porque de otro modo su propia emisión de calor impediría obtener medidas.

### 2.4.1. Datos del satélite Planck

La misión científica Planck tiene como objetivo la puesta en órbita de un satélite con receptores de tipo radiómetro en las bandas entre 30 y 850 GHz. El satélite Planck tiene previsto su lanzamiento en el año 2008 y se lanzará de forma compartida con el satélite Herschel en una misión conjunta con la lanzadera europea Ariane V, Figura 2.6 (a). Los dos satélites se separarán después del lanzamiento y ocuparán órbitas diferentes. Planck estará en órbita de Lissajous alrededor del punto Lagrangiano 2 del sistema Sol-Tierra-Luna, situado a unos 1,5 millones de kilómetros de la Tierra, aproximadamente 4 veces la distancia de la Tierra a la Luna. Este punto se ha elegido para minimizar las contribuciones de fuentes de radiación potentes, como la Tierra, el Sol o la Luna, que podrían interferir con sus emisiones e impedir la recepción de la señal de radiación cósmica del fondo de microondas.

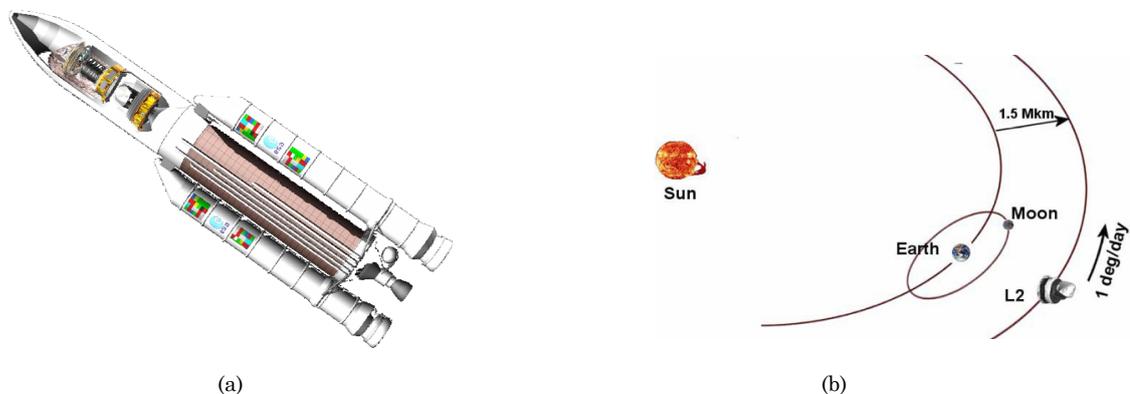


Figura 2.6. (a) Satélites Planck y Herschel en la lanzadera Ariane V; (b) Órbita de Lissajous, punto Lagrangiano 2

El satélite Planck girará sobre sí mismo lentamente a una velocidad de una revolución por minuto, observando con cada vuelta una parte del cielo. De esta forma en 15 meses habrá barrido todo el cielo dos veces.

El satélite operará de forma completamente automática y descargará los datos adquiridos cada día hacia la estación terrena de la ESA, en Perth (Australia) en un periodo de tres horas.

El tamaño aproximado del satélite Planck es de 4 x 4,5 m y una masa de 1.5 toneladas. La fotografía de la Figura 2.7 muestra una maqueta a escala real del satélite. Se puede distinguir fácilmente el reflector primario (de color blanco) y el escudo protector (de color negro) que evitará la recepción de señales provenientes del Sol y de los planetas más cercanos.



Figura 2.7. Maqueta del satélite Planck.

### 2.4.2. Componentes de la misión Planck

Los componentes más importantes de la misión Planck, son los siguientes:

Un telescopio con antena de tipo gregoriano con un gran reflector primario de 1,5 m de diámetro [39]. El eje óptico del reflector primario está desplazado respecto al eje de rotación. El ancho de haz es de decenas de arco minuto y define el número de píxeles de las imágenes obtenidas en cada frecuencia. La Figura 2.8 muestra esquemáticamente el sistema de la antena del telescopio.

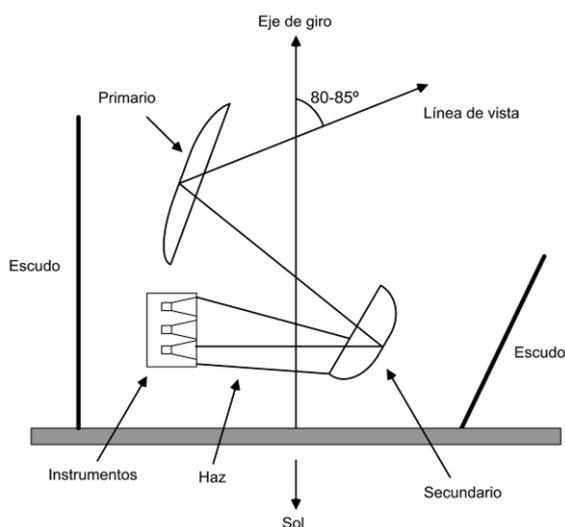


Figura 2.8. Sistema de la antena del telescopio de Planck.

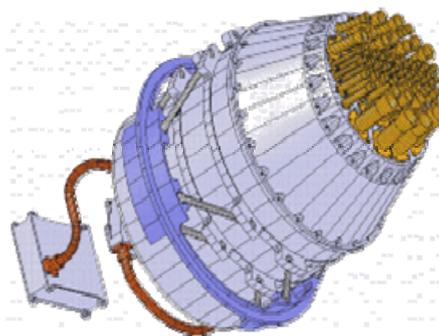
Un instrumento de alta frecuencia (HFI) recibirá señales en 6 bandas entre 100 y 857 GHz utilizando bolómetros muy sensibles enfriados a 0.1 Kelvin, [40], [41].

Un instrumento de baja frecuencia (LFI), [42], [43], recibirá señales en las bandas de 30, 44 y 70 GHz, utilizando amplificadores de muy bajo ruido con transistores HEMT de InP, enfriados a 20 K.

El instrumento HFI ocupa el centro del plano focal mientras que los frontales de RF de los receptores del LFI están rodeando a aquel. La Figura 2.9 muestra la distribución de las bocinas de los frontales del LFI y una vista general del HFI.



(a)



(b)

Figura 2.9. (a) Distribución de las bocinas del LFI; (b) Vista general del instrumento HFI

### 2.4.3. El instrumento de baja frecuencia (LFI)

En la Figura 2.10 (a) se muestra un dibujo tridimensional y en la Figura 2.10 (b) una fotografía real del instrumento QM-LFI. En el dibujo se puede ver el instrumento HFI integrado en el plano focal, con el LFI.

Hay dos estructuras de soporte, una en la parte superior y otra en la parte inferior, para tener mayor robustez en las guías de onda, que son de aproximadamente 1.5 m de largo. En las guías de onda hay tres radiadores ('V-grooves'), con forma cónica, para disipar el calor procedente de la parte caliente de módulo de servicio.

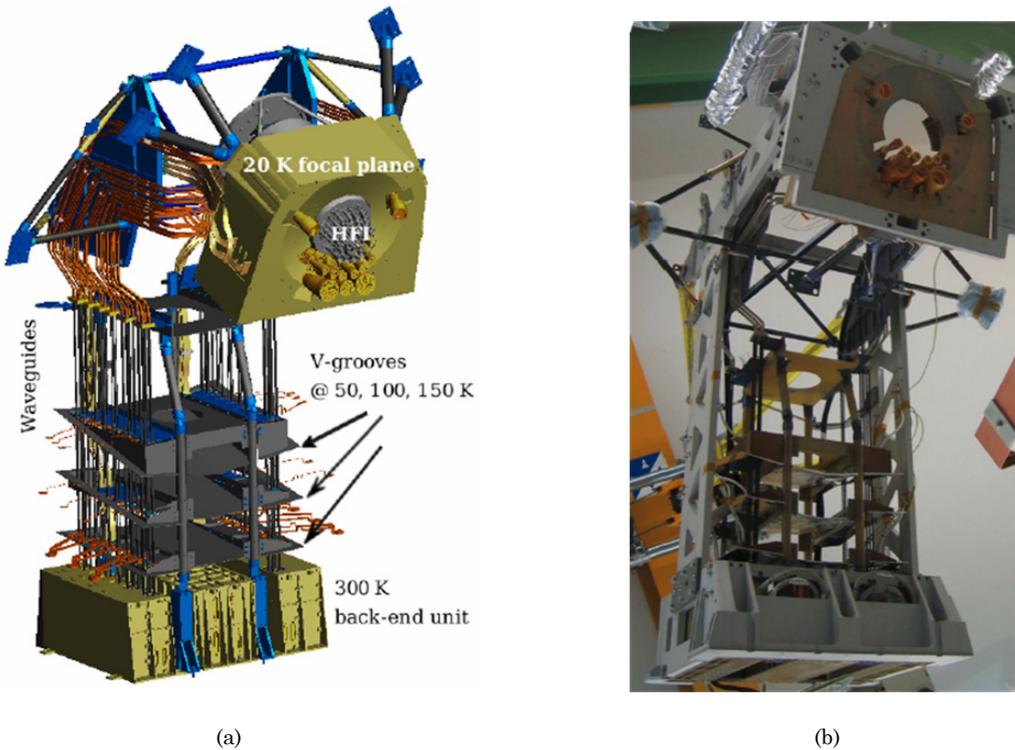


Figura 2.10. Instrumento Planck-LFI. (a) Dibujo 3-D del instrumento LFI con las bocinas del instrumento HFI en la parte central del plano focal; (b) Modelo de calificación (QM) del LFI

El diagrama de bloques del instrumento LFI se muestra en la Figura 2.11. El LFI contiene 22 radiómetros diferenciales. Hay cuatro radiómetros a 30 GHz, seis a 44 GHz y doce a 70 GHz, todos ellos con un veinte por ciento de ancho de banda efectivo.

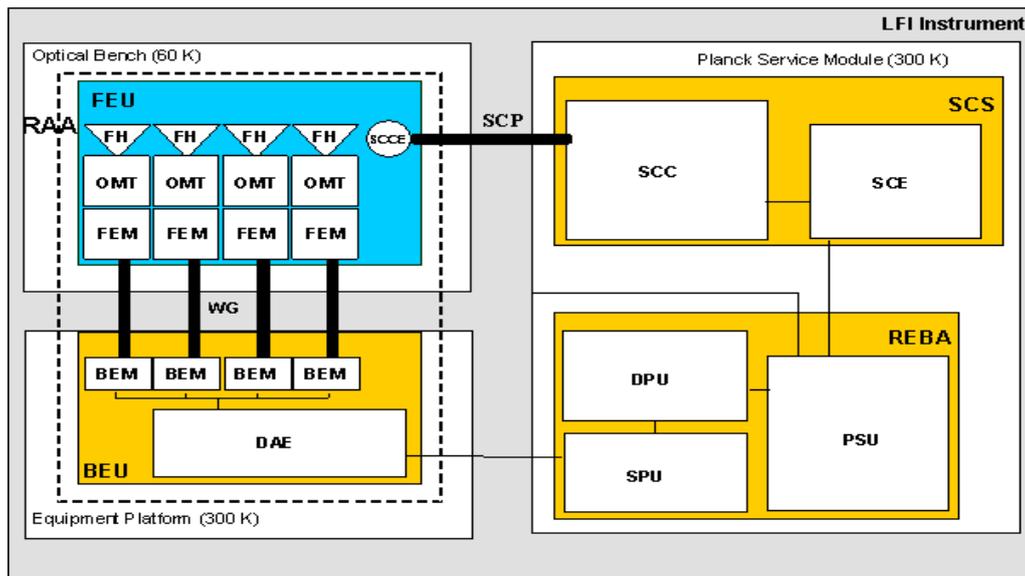


Figura 2.11. Diagrama de bloques del instrumento LFI.

### a) *Subsistemas del LFI*

Como se puede apreciar en la Figura 2.11 el instrumento LFI está formado por los siguientes subsistemas:

- RAA (Radiometer Array Assembly). Incluye la unidad frontal (Front End Unit = FEU) y la unidad posterior (Back End Unit = BEU), conectados por guías de onda rectangulares (Waveguides = WG) de aproximadamente un metro de longitud.
- SCS (Sorption Cooler Subsystem). Este criostato está alojado en el módulo de servicio del satélite y enfría toda la unidad frontal a una temperatura de 20K.
- REBA (Radiometer Electronics Box Assembly). Está localizado en uno de los paneles laterales del módulo de servicio del satélite.
- El FEU está enfriado a 20K y consta de las siguientes componentes:
  - FH (Feed Horns), Bocinas.
  - OMTs (Orthomode Transducers), Transductores ortomodo.
  - FEM (Front End Modules). Módulos frontales.
- El BEU está a una temperatura de 300K e incluye los componentes:
  - BEM (Back End Modules). Módulos posteriores.
  - DAE (Data Acquisition Electronics). Unidad electrónica de adquisición de datos.

### b) *Funcionamiento del LFI*

El frontal de RF (FEU), contiene varias bocinas (FH) para cada uno de los canales, frecuencias de 30 GHz, 44 GHz, y 70 GHz. La señal recibida se separa en las polarizaciones vertical y horizontal mediante un transductor ortomodo (OMT). Los circuitos amplificadores están incluidos en el módulo frontal (FEM).

Las señales amplificadas por el frontal de RF se envían mediante guías de onda rectangulares (WG), de una longitud aproximada de un metro y medio, a la unidad posterior (BEU), donde se vuelven a amplificar, se filtran y se detectan mediante los módulos posteriores (BEM). Las señales detectadas se digitalizan mediante la unidad electrónica de adquisición de datos (DAE). Los datos de la versión digitalizada de las señales se almacenan en las memorias de la caja electrónica del radiómetro (REBA). Estos datos se descargan periódicamente desde el satélite hacia la estación terrena de acuerdo a las operaciones de telemetría y telecontrol de la misión.

Dada la gran diferencia de temperatura existente entre el frontal de RF y los módulos posteriores, el satélite llevará unos anillos de aislamiento térmico para evitar que el calor de la unidad BEU se transmita hacia la FEU.

En el capítulo 3, se detalla el análisis de los receptores del instrumento de baja frecuencia (LFI)

## 2.5. Estado de la técnica de los amplificadores de bajo ruido

Los componentes más importantes en los receptores de radiometría son los amplificadores de bajo ruido proporcionando bandas de trabajo anchas. Ya que, como se ha visto anteriormente, la sensibilidad que se puede conseguir es directamente proporcional al ruido del sistema e inversamente proporcional al ancho de banda efectivo.

La evolución en los amplificadores de bajo ruido ha sido grande en los años recientes. De amplificadores complicados, grandes y pesados se ha pasado a tener en la actualidad transistores HEMT (High Electron-Mobility Transistor) de InP (Indium Phosphide) con un comportamiento en ruido y ganancia muy bueno, y alcanzando bandas de frecuencia no consideradas en el pasado.

En los años ochenta los amplificadores de bajo ruido se diseñaban con transistores FET (Field Effect Transistor), o bipolares, y los amplificadores eran paramétricos, Maser (microwave amplification by stimulated emission of radiation), y ya se enfriaban criogénicamente a temperatura de nitrógeno líquido (77 Kelvin) o termoeléctricamente. Un resumen del estado de la técnica de los amplificadores en estos años, se presentó en [44].

En [45], se presentan los amplificadores de bajo ruido, tanto discretos como integrados publicados durante los años noventa, en varias bandas de frecuencia.

En [46] se hace una revisión de los dispositivos de bajo ruido utilizados para instrumentos de microondas utilizados en radioastronomía, y en [47] se muestra el progreso del comportamiento de ruido para amplificadores discretos enfriados durante las últimas décadas.

En la actualidad los transistores utilizados para bajo ruido son HEMT o PHEMT (Pseudomorphic –HEMT), y se realizan tanto circuitos discretos, como integrados MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit), con tecnologías muy avanzadas para conseguir comportamientos de ruido y ganancia óptimos. Los avances realizados permiten obtener buenos comportamientos en ruido, sistemas más pequeños, menor consumo, anchos de banda grandes y frecuencias de operación mayores. Y con esto, se ha llegado a la realización de módulos de microondas multichip con MMIC, para aplicaciones espaciales o la realización de “phased arrays”.

Los avances en los materiales semiconductores y los procesos de fabricación han permitido conseguir dispositivos con parámetros mejorados, como mayor transconductancia, menor longitud de puerta, frecuencias de corte más altas, y por lo tanto obtener menores figuras de ruido en la región de microondas y frecuencias de operación más altas. La tecnología de InP proporciona HEMT con transconductancias muy altas, de aproximadamente el doble que la de un PHEMT basado en GaAs. Sin embargo las obleas de InP no han alcanzado el desarrollo de las de GaAs, lo que ha forzado el desarrollo de la tecnología metamórfica MHEMT (Metamorphic High Electron Mobility Transistor), mediante el crecimiento de Indio sobre sustratos de GaAs, teniendo la ventaja de la madurez de estos últimos en cuanto a coste y tamaño de fabricación de la oblea [48], [49].

Con cualquier tecnología, el poder enfriar los dispositivos criogénicamente permite tener amplificadores con ruidos extremadamente bajos. Los LNA HEMT son enfriados criogénicamente por dos razones: Se mejoran las propiedades de transporte de los electrones, y se reduce el ruido térmico de los elementos parásitos.

Los mejores resultados para amplificadores de bajo ruido, enfriados criogénicamente, en tecnología MIC en las bandas C y X son con InP y se presentan en [50]- [52]. En [52] un MIC de dos etapas en la banda de 4-8 GHz, a temperatura ambiente tiene una ganancia de 27 dB y una temperatura de ruido de 31 K, enfriado a 15 K, la temperatura de ruido es de tan sólo 1.4 K.

Las bandas en las que se ha trabajado en esta tesis dentro del proyecto Planck son la banda Ka y la banda Q. Algunos MMIC LNA de la banda Ka han demostrado una figura de ruido mínima utilizando GaAs [53], tecnología MHEMT creciendo Indio sobre sustrato de GaAs, [48], InP [54] y InAs/AlSb [55]. En [56] presenta un LNA en tecnología MMIC con transistores HEMT 0.1  $\mu\text{m}$  de InP, en la banda Ka de 26 a 40 GHz, a temperatura ambiente con ganancia 21.9 dB y 1.5 dB de ruido en promedio. Enfriado a 12 K su ganancia es de 23 dB y la temperatura de ruido promedio es 15.5 K. En la banda Q [57] presenta un LNA en MMIC con tecnología de InP de 0.1  $\mu\text{m}$  de longitud de puerta, enfriado a 20 K que proporciona una ganancia de 25 dB y una temperatura de ruido de alrededor de 20 K desde 36 hasta 40 GHz.

Como conclusión, se puede decir que la mejor opción para bajo ruido son los transistores PHEMT, y con los de tecnología de InP se han conseguido los mejores resultados de ruido y ganancia, pero aún no existe comercialización de estos procesos, debido principalmente a la fragilidad y pequeño tamaño de las obleas, junto con un bajo volumen, lo que hacen que el coste por milímetro sea elevado.

Dentro del proyecto Planck, los dispositivos de InP, utilizados en los amplificadores de bajo ruido del módulo frontal, criogénicamente enfriados, han proporcionado los mejores resultados de ruido en la actualidad en la banda Ka. Con cuatro etapas amplificadoras se han conseguido 9.4 Kelvin de ruido con una ganancia asociada de 35 dB cuando están enfriados a 20 Kelvin, y sobre un ancho de banda de 6 GHz [14].

Para la realización de circuitos, hasta 40 GHz generalmente se utilizan HEMT y PHEMT como dispositivos activos. Desde 100 GHz hasta 1 THz los dispositivos más utilizados son uniones superconductor-aislante-superconductor (SIS - Superconductor-Insulator-Superconductor), y por encima de 1 THz se utilizan los bolómetros (HEB - Hot Electron Bolometer) ya que proporcionan las temperatura de ruido más bajas [58]-[60].

## 2.6. Conclusiones

Se ha descrito el origen de la radioastronomía, con los principales avances realizados a lo largo de la historia, hasta la actualidad. Dentro de la radioastronomía, se ha hecho una introducción a los radiómetros y los diferentes tipos existentes, ya que todo el trabajo realizado está incluido dentro del instrumento de baja frecuencia del proyecto Planck, basado en radiómetros. Los parámetros más importantes para un radiómetro

## 2.6. Conclusiones

de potencia total, por ser el receptor más básico para medidas de potencia procedentes de emisiones de objetos celestes, han sido analizados, con el fin de conocer el funcionamiento de un radiómetro, y obtener la expresión de su sensibilidad.

Se ha descrito la misión Planck, incluyendo datos del satélite y los instrumentos que la forman. Se ha descrito con más detalle el instrumento de baja frecuencia, ya que en él se encuentra incluido, todo el trabajo desarrollado.

Finalmente se ha hecho un resumen de los avances en los amplificadores de bajo ruido en los últimos años. Actualmente la tecnología de InP está permitiendo obtener amplificadores de temperatura de ruido extremadamente baja, empleándose en la construcción de numerosos instrumentos criogénicamente enfriados, para la investigación sobre el origen del Universo.

Dentro del proyecto Planck, en las bandas de 30 y 44 GHz, se han conseguido amplificadores de bajo ruido híbridos contruidos con transistores HEMT de InP, para los módulos frontales, que enfriados a 20 Kelvin, tienen el mejor comportamiento de ruido conseguido hasta la actualidad.