

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones



TESIS DOCTORAL

Cryogenic Technology in the Microwave Engineering:
Application to MIC and MMIC Very Low Noise
Amplifier Design

Juan Luis Cano de Diego

Santander, Mayo 2010

Chapter I

Introduction

At the beginning there was nothing, neither space nor time. At some time around 13.730 million years ago, the space appeared everywhere in the Universe in a process called Big-Bang. The Universe was filled homogeneously and isotropically with an incredibly high energy density, huge temperatures and pressures, and was very rapidly expanding and cooling. Approximately 10^{-37} seconds after the Big-Bang the cosmic inflation started and the Universe expanded exponentially. As long as the Universe was growing and cooling the elementary particles and antiparticles were created. These particle-antiparticle pairs were being continuously created and destroyed in collisions transforming their mass into energy but, at some time, a tiny amount of particles did not find their corresponding antiparticles and an excess of matter over antimatter resulted in the Universe.

The Universe continued growing and cooling. At about 10^{-6} seconds the elementary particles started to form other more complex particles such as protons and neutrons and their corresponding antiparticles. Once again the particle-antiparticle pairs were annihilated but a small amount of particles remained. At this point the temperature was no longer high enough to produce new particles so the original number of particles was reduced to a great extent. Around one second after the Big-Bang a similar process generated the electrons and the energy density of the Universe was dominated by photons. Few minutes later, protons and neutrons started to combine forming first atoms nuclei such as deuterium, helium and hydrogen and, around 379.000 years later, the temperature was low enough for the electrons and nuclei to combine into atoms (recombination). As a consequence, the radiation (photons) decoupled from matter and continued travelling through space. This relic radiation is known as Cosmic Microwave Background (CMB) radiation. Finally, over a long period of time, the slightly denser regions of the nearly uniformly distributed matter gravitationally attracted nearby matter and thus grew even denser, forming gas clouds, stars, galaxies, and the other

astronomical structures observable today. This explanation of the Universe formation and evolution corresponds to the Big-Bang theory [1.1]-[1.3] which is the most plausible theory today. A timeline of the Universe evolution according with this theory is presented in Fig. 1.1.

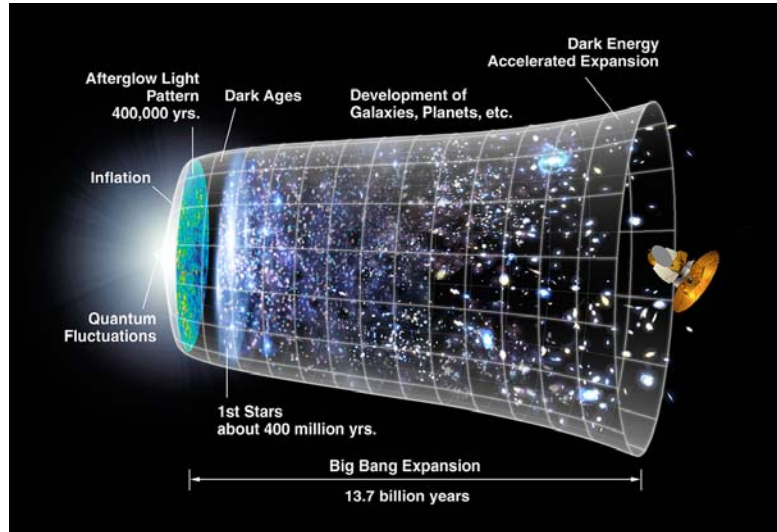


Fig. 1.1. Timeline of the Universe evolution according with the Big-Bang theory [1.3].

1.1. The Cosmic Microwave Background (CMB)

But let's back to 379.000 years after the Big-Bang. Before recombination, photons were continuously reflected by the free electrons in a process called Thomson scattering which produces a black body¹ spectrum. Due to this multiple scattering process the early Universe before recombination was opaque to light.

When the temperature reached a few thousand kelvin the recombination process started and electrons and nuclei started to combine to form neutral atoms. From that moment on photons were free to travel all along the Universe producing the CMB observed today. The energy of photons was subsequently redshifted by the expansion of the Universe, which preserved the black body spectrum but caused its temperature to fall, meaning that the photons now fall into the microwave region of the electromagnetic spectrum. The radiation is thought to be observable at every point in the Universe, comes from all directions, and its temperature is extremely uniform all over the sky. However, tiny temperature variations or fluctuations (at the part per million level) can offer great insight into the origin, evolution, and content of the Universe. The observed

¹ A black body is an idealized object that absorbs all electromagnetic radiation that falls on it. No electromagnetic radiation passes through it and none is reflected. However, a black body emits a temperature-dependent spectrum of light [1.4].

pattern of fluctuations in the CMB is a direct picture of the Universe at this early epoch [1.2], [1.3].

As it has been mentioned, the existence of the CMB was predicted in the Big-Bang theory but it was not discovered until 1964 when A. Penzias and R. Wilson found it accidentally during a test campaign at Bell Laboratories using a high sensitivity receiver. The antenna received a weak *noise* signal which could not be eliminated wherever it was pointed to [1.5]. This radiation was found to be isotropic and consistent with a black body spectrum of about three kelvin. The result obtained by Penzias and Wilson agreed with the prediction made by the cosmologist P. J. E. Peebles and since then this result is the most important evidence that supports the Big-Bang theory.

Since the CMB was first measured many different ground-based projects and space missions have been developed to measure its characteristics. The first space mission dedicated to the measurement of the CMB anisotropies was COBE (COsmic Background Explorer, launched in 1989), developed by NASA. One of the instruments onboard this satellite measured the CMB spectrum and found it to be nearly a black body with a temperature of 2.725 ± 0.002 K. This observation matched the predictions of the Big-Bang theory extraordinarily well.

In 2001 another space mission from NASA called WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) was launched to study the CMB in more detail. The skymap data derived from the WMAP observations have 45 times the sensitivity and 33 times the angular resolution of the COBE mission; hence the *pictures* of the early Universe taken by WMAP are much more precise as shown in Fig. 1.2.

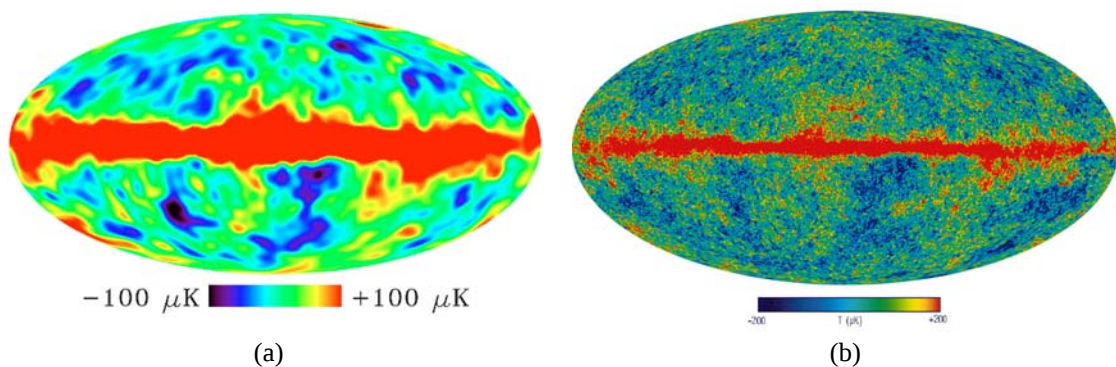


Fig. 1.2. Full-sky maps of the CMB anisotropy and foreground signal from our galaxy (in red); (a) skymap from COBE at 90 GHz; (b) skymap from WMAP at 94 GHz. The orientation of maps is such that the plane of the Milky Way runs horizontally across the center of each one [1.3].

Recently, in May 2009, a new probe was launched by ESA with similar goals to WMAP but improved accuracy (sensitivity and angular resolution). This new mission called Planck will provide maps in many different frequencies: the LFI (Low Frequency

Instrument) covers three bands with center frequencies at 30, 44 and 70 GHz using solid-state technology, whereas the HFI (High Frequency Instrument) covers from 100 to 857 GHz in six different bands using bolometers [1.6].

1.2. Cryogenic Receivers for High Sensitivity Experiments

The reception of very weak signals such as the CMB requires receivers with very high sensitivity, which should be better than the magnitude to be measured. There are many different configurations of radiometers but all their sensitivities can be analyzed with the simple approach given by (1.1).

$$\Delta T = K \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{B \cdot \tau}} \quad (1.1)$$

The above equation is known as the *radiometer equation* and gives the sensitivity of the receiver taking into account its system noise temperature T_{sys} , its bandwidth B , and the integration time τ . The value of the constant K depends on the radiometer configuration. A quick examination of (1.1) produces two interesting conclusions: the receiver sensitivity is directly dependent on the system noise temperature, and the integration time needed to achieve certain sensitivity is proportional to the square of the system noise temperature. Therefore, very low noise receivers are required in radio astronomy to study phenomena such as the CMB.

In order to reduce the system noise temperature to very low values that enable the required sensitivity the only solution is to cool down the receiver to cryogenic temperatures. This cooling process is carried out with special systems called *cryostats* which, in many cases, need to be specifically designed. The development of very specific equipment requires a great investment and therefore cryogenic receivers are used almost exclusively in applications such as radio astronomy and deep space communications (communications with very distant spacecrafts) which can afford these high costs to receive very weak signals.

1.3. Thesis Motivation

From 1999 to 2007 the Department of Ingeniería de Comunicaciones (DICOM) of the University of Cantabria (UC), Spain, was involved in the Planck project². In this project the DICOM was responsible of the main part of the design and the whole integration of the Back-End Module (BEM) prototypes at 30 and 44 GHz. In a typical radiometer architecture, such as the Planck LFI receivers, the antenna and optical instruments are followed by the Front-End Module (FEM), which is usually cooled

² Currently the DICOM only develops supporting back-up tasks for its designs in the Planck project.

down to cryogenic temperatures, and the FEM is followed by the BEM, which typically works at room temperature (RT), just before the data acquisition stage.

Although the systems made for the Planck project were designed to work at RT, the participation in this radio astronomy project made to emerge a great interest in designing cooled systems with the aim of being able to build a full radiometer in future projects. Therefore the Planck project can be considered the seed of this thesis.

If the receiver block diagram shown in Fig. 1.3 is considered, in which each subsystem is characterized by its gain G and noise temperature T_e , then the system noise temperature of the receiver is given by *Friis equation* (1.2).

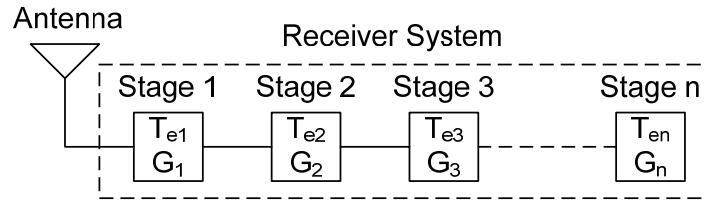


Fig. 1.3. Block diagram of a generic receiver system.

$$T_{\text{sys}} = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{T_{en}}{G_1 \cdot \dots \cdot G_{n-1}} \quad (1.2)$$

In order to minimize T_{sys} the first element in the receiver should be a subsystem with high gain and very low noise temperature. For this reason cryogenic amplifiers are used in the receiver front-ends where they are cooled down to cryogenic temperatures.

Cryogenic amplifiers are widely used in radio astronomy centers all around the world where they have reached the best results today. Figure 1.4 shows the state-of-the-art in cryogenic amplifiers up to 50 GHz (updated in 2009) together with the noise measure³ prediction made by M. W. Pospieszalski in 1992 [1.7].

³ The noise figure is a more proper figure of merit when multistage amplifiers are considered. It takes into account not only the device noise figure but also its associated gain. The minimum noise measure of an amplifier made of an infinite number of stages is given by (1.3) [1.9].

$$M_{\text{min}} = \left(\frac{T_n}{1 - \frac{1}{G_a}} \right)_{\text{min}} \quad (1.3)$$

Where T_n is the noise temperature and G_a the available gain of the amplifier.

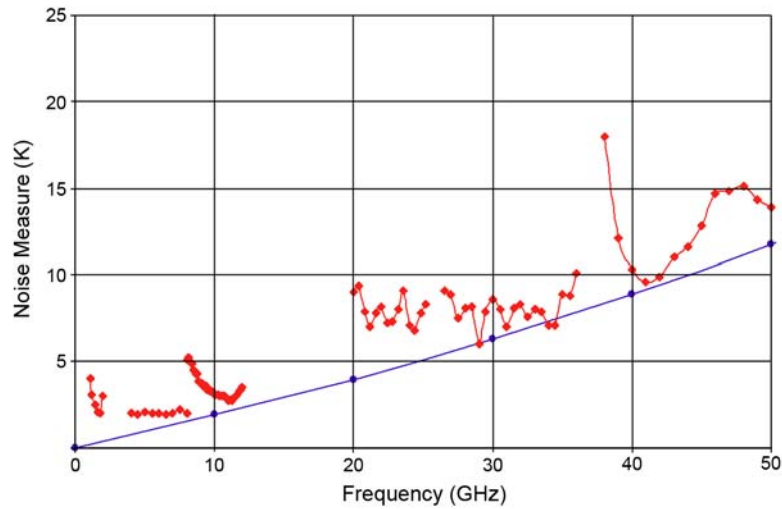


Fig. 1.4. Comparison between the prediction for the minimum noise measure of a 100 nm gate length cryogenic HFET (1992) in blue and the best results reported to 2009 for cryogenic amplifiers in red [1.8].

This thesis, started in 2005, gathers the first steps of DICOM in cryogenics and focuses in the design of cryogenic amplifiers as the most important component in cryogenic receivers. The design of this kind of amplifiers requires solving many previous subjects related with cryogenic technology; hence this work covers these concepts in detail providing a background for future developments in the DICOM.

1.4. Work Outline

At the beginning of this thesis the first cryostat purchased by the DICOM had been recently received and it was still packed in its original box. From that moment on many different problems related with cryogenics have been faced and solved enabling the design and test of cryogenic amplifiers and other radiometer subsystems. This document collects all the work carried out during these years and presents the most significant results divided in the following chapters.

Chapter II details the set-up process of the cryogenic facility available in the DICOM laboratory nowadays. Currently the DICOM has two operating cryogenic systems which have been designed and installed during this work. The chapter presents the basic calculations needed to design the systems, practical advice to get a good performance, and the modifications required to enable their operation in microwave applications.

The wide field of the measurement of microwave parameters in a cryogenic environment is covered in Chapter III. The chapter gives some alternatives to measure the Scattering parameters (S-parameters) and the noise temperature of cooled devices or systems. This chapter focuses in the cold-attenuator technique to measure noise and a

comprehensive study of the measurement uncertainty with this technique is presented. Also, a new attenuator design that improves the noise measurement accuracy is included in this chapter.

Chapter IV is the basis for the design of the cryogenic amplifiers covered in the two subsequent chapters. This chapter studies the effect of low temperatures in microwave devices, especially transistors based on indium-phosphide (InP) technology. This study covers DC and S-parameters as well as noise performance as a function of temperature and device structure.

The design and characterization of cryogenic LNAs carried out during this work is presented in Chapters V and VI. In the first one a Ka-band LNA is designed in hybrid technology (MIC) using InP discrete transistors; whereas in the second one another Ka-band LNA is designed in monolithic (MMIC) technology using metamorphic gallium-arsenide transistors. The advantages and disadvantages of both technologies can be appreciated from these two chapters.

Chapter VII presents other subsystems often used in radio astronomy receivers. First, a short introduction to radio astronomy receivers is given and then, the design and characterization of some components such as the orthomode transducers, the polar modulators and the back-end modules, designed for the QUIJOTE project (a ground-based project started in 2007 to study the polarization of the CMB), are shown.

Finally, Chapter VIII summarizes the main results obtained along the thesis as well as it presents the main conclusions extracted from the document and gives some future directions in order to continue with this work.

Capítulo I

Introducción

Al principio no había nada, ni espacio ni tiempo. En algún momento hace alrededor de 13.730 millones de años, el espacio apareció por todo el Universo en un proceso llamado Big-Bang o gran explosión. El Universo estaba relleno de forma homogénea e isotrópica por una densidad de energía increíblemente grande, presiones y temperaturas enormes, y se estaba expandiendo y enfriando muy rápidamente. Aproximadamente 10^{-37} segundos después del Big-Bang la inflación cósmica empezó y el Universo se expandió exponencialmente. A medida que el Universo crecía y se enfriaba se creaban las partículas y antipartículas. Los pares partícula-antipartícula estaban continuamente creándose y destruyéndose transformando su materia en energía pero, en algún momento, una diminuta cantidad de partículas no interaccionó con sus correspondientes antipartículas y como resultado hubo un exceso de materia sobre antimateria en el Universo.

El Universo continuaba creciendo y enfriándose. Alrededor de 10^{-6} segundos después de la gran explosión las partículas elementales comenzaron a formar otras partículas más complejas como protones y neutrones y sus correspondientes antipartículas. Una vez más los pares partícula-antipartícula se aniquilaron pero una pequeña cantidad de partículas permaneció. En este punto la temperatura ya no era lo suficientemente alta como para producir nuevas partículas con lo que el número original de partículas disminuyó casi hasta desaparecer. Alrededor de un segundo después del Big-Bang un proceso similar generó los electrones y por tanto la densidad de energía del Universo se vio dominada por los fotones. Tras algunos minutos, los protones y neutrones comenzaron a combinarse formando los primeros núcleos de átomos como el deuterio, el helio y el hidrógeno y, alrededor de 379.000 años después, la temperatura era lo suficientemente baja como para permitir que los núcleos de los átomos y los electrones se combinaran en átomos neutros (recombinación). Como consecuencia, la radiación (fotones) se separó de la materia y continuó viajando libremente a través del

espacio. Esta primitiva radiación es conocida como radiación de fondo de microondas (CMB). Finalmente, a lo largo de un gran periodo de tiempo, las regiones ligeramente más densas existentes entre la materia distribuida de forma casi uniforme atrajeron gravitacionalmente la materia que las rodeaba con lo cual estas regiones se volvieron aún más densas, formando nubes de gas, estrellas, galaxias y otras estructuras astronómicas observables hoy en día. Esta explicación sobre la formación y evolución del Universo corresponde a la llamada teoría del Big-Bang [1.1]-[1.3] la cual es la teoría más plausible que se tiene actualmente. En la Fig. 1.1 se representa la línea temporal de la evolución del Universo de acuerdo con la citada teoría.

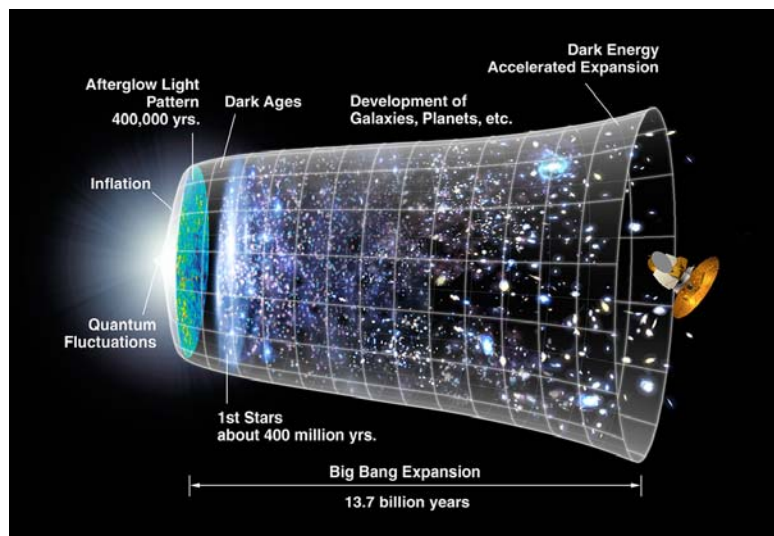


Fig. 1.1. Línea temporal de la evolución del Universo de acuerdo a la teoría del Big-Bang [1.3].

1.1. El Fondo Cósmico de Microondas (CMB)

Pero volvamos a 379.000 años después del Big-Bang. Antes de la recombinación, los fotones eran continuamente reflejados por los electrones libres en un proceso llamado dispersión de Thomson, el cual produce un espectro de cuerpo negro¹. Debido a este múltiple proceso de dispersión el Universo primitivo antes de la recombinación era opaco a la luz.

Cuando la temperatura alcanzó unos pocos millares de kelvin el proceso de recombinación empezó y los electrones y núcleos de los átomos comenzaron a combinarse para formar átomos neutros. A partir de este momento los fotones se encontraron libres para viajar a lo largo del Universo produciendo el CMB observado hoy en día. La energía de los fotones fue posteriormente desplazándose hacia longitudes

¹ Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe toda la radiación electromagnética que le llega. Ninguna radiación electromagnética lo atraviesa ni se refleja. Sin embargo, un cuerpo negro emite un espectro de luz dependiente de su temperatura [1.4].

de onda mayores debido a la expansión del Universo la cual mantenía su espectro de cuerpo negro pero causaba que su temperatura disminuyese; esto significa que la radiación se encuentra hoy en día en el rango de las microondas dentro del espectro electromagnético. Se piensa que esta radiación es observable en todo punto del Universo, que viene de todas direcciones, y que su temperatura es extremadamente uniforme en todo el espacio. Sin embargo, pequeñas variaciones de temperatura o fluctuaciones (del orden de una parte por millón) pueden ofrecer un gran entendimiento sobre el origen, evolución y contenido del Universo. El patrón de fluctuaciones observado en el CMB es una fotografía directa del Universo en su época primitiva [1.2], [1.3].

Como se ha mencionado anteriormente, la existencia del CMB se predice en la teoría del Big-Bang pero no fue descubierta hasta 1964 cuando A. Penzias y R. Wilson la encontraron accidentalmente durante una campaña de medidas en los laboratorios Bell usando un receptor de alta sensibilidad. La antena recibía una débil señal de *ruido* la cual no se podía eliminar donde quiera que se apuntara dicha antena [1.5]. Se comprobó que esta radiación era isotrópica y consistente con el espectro de un cuerpo negro a unos tres kelvin. El resultado obtenido por Penzias y Wilson coincidía con la predicción hecha por el cosmólogo P. J. E. Peebles y desde entonces este resultado es la prueba más importante que sustenta la teoría de la gran explosión.

Desde que el CMB se midió por primera vez muchos proyectos terrestres y misiones espaciales se han desarrollado para medir sus características. La primera misión espacial dedicada a la medida de las anisotropías del CMB fue COBE (COsmic Background Explorer, lanzada en 1989), desarrollada por la NASA. Uno de los instrumentos a bordo de este satélite midió el espectro del CMB y encontró que era prácticamente el de un cuerpo negro a una temperatura de 2.725 ± 0.002 K. Esta medida coincidía con las predicciones de la teoría del Big-Bang de forma extraordinaria.

En el año 2001 otra misión espacial de la NASA llamada WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) se lanzó para estudiar el CMB con más detalle. Los datos del cielo derivados de las observaciones de WMAP tienen 45 veces más sensibilidad y 33 veces más resolución angular que las de la misión COBE; por tanto las fotos del Universo primitivo tomadas por WMAP son mucho más precisas como se muestra en la Fig. 1.2.

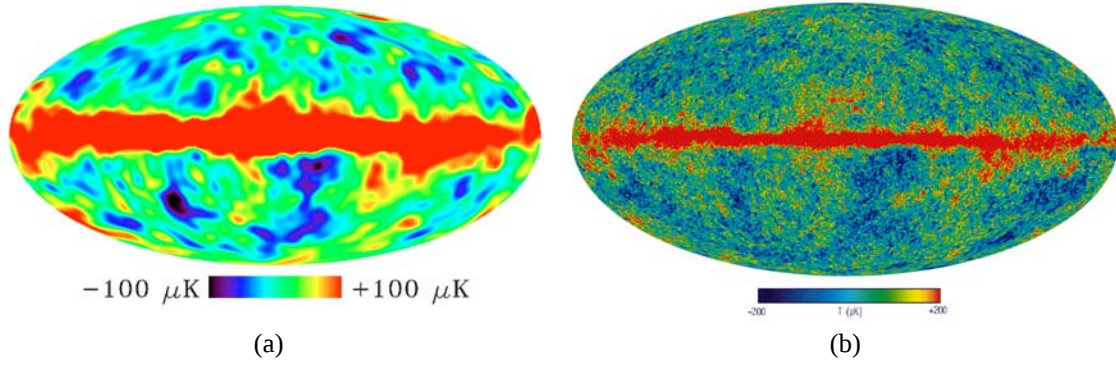


Fig. 1.2. Mapas celestes completos de las anisotropías del CMB con la señal de nuestra galaxia (en rojo) en primer plano; (a) mapa celeste de COBE a 90 GHz; (b) mapa celeste de WMAP a 94 GHz. La orientación de los mapas es tal que el plano de la Vía Láctea se presenta de forma horizontal en el centro de cada imagen [1.3].

Recientemente, en mayo de 2009, una nueva sonda fue lanzada por la ESA con objetivos similares a WMAP pero con una precisión mejorada (sensibilidad y resolución angular). Esta nueva misión llamada Planck proporcionará mapas a muchas frecuencias diferentes: el LFI (instrumento de baja frecuencia) cubre tres bandas con frecuencias centrales a 30, 44 y 70 GHz usando tecnología de estado sólido, mientras que el HFI (instrumento de alta frecuencia) cubre desde 100 hasta 857 GHz en seis bandas diferentes con bolómetros [1.6].

1.2. Receptores Criogénicos para Experimentos de Alta Sensibilidad

La recepción de señales muy débiles como el CMB requiere receptores con muy alta sensibilidad, la cual debería ser mejor que la magnitud a medir. Hay muchas configuraciones diferentes de radiómetros pero todas sus sensibilidades se pueden analizar partiendo de la misma ecuación (1.1).

$$\Delta T = K \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{B \cdot \tau}} \quad (1.1)$$

La anterior ecuación es conocida como *ecuación del radiómetro* y permite calcular la sensibilidad de un receptor a partir de su temperatura de ruido T_{sys} , su ancho de banda B , y el tiempo de integración τ . El valor de la constante K depende de la configuración del radiómetro. Un ligero examen a (1.1) proporciona dos interesantes conclusiones: la sensibilidad del receptor es directamente proporcional a la temperatura de ruido del sistema, y el tiempo de integración necesario para alcanzar una cierta sensibilidad es proporcional al cuadrado de la temperatura de ruido del sistema. Por tanto, en radio astronomía son necesarios receptores de muy bajo ruido para poder estudiar fenómenos como el CMB.

Para reducir la temperatura de ruido del sistema hasta valores que permiten alcanzar la sensibilidad requerida la única solución es enfriar el receptor hasta

temperaturas criogénicas Este proceso de enfriamiento se lleva a cabo con sistemas especiales llamados criostatos, los cuales se tienen que diseñar específicamente en muchos casos. El desarrollo de equipamiento muy específico requiere de una gran inversión y por tanto los receptores criogénicos se usan casi de forma exclusiva en aplicaciones como la radio astronomía y las comunicaciones de espacio profundo (comunicaciones con sondas muy lejanas) las cuales pueden permitirse ese gran gasto para poder detectar señales muy débiles.

1.3. Motivación de la Tesis

Desde 1999 hasta 2007 el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (DICOM) de la Universidad de Cantabria (UC), España, estuvo involucrado en el proyecto Planck². En este proyecto el DICOM era responsable de la mayor parte del diseño y de la integración completa de los prototipos de los módulos posteriores (BEM) a 30 y 44 GHz. En la configuración típica de un radiómetro, como los receptores del LFI de Planck, la antena y los sistemas ópticos preceden al modulo anterior (FEM), el cual se enfría a temperaturas criogénicas, y éste es seguido del BEM, el cual típicamente trabaja a temperatura ambiente (RT), justo antes de la etapa de adquisición de datos.

Aunque los sistemas realizados para Planck estaban diseñados para trabajar a RT la participación en este proyecto de radio astronomía hizo surgir un gran interés en el diseño de sistemas enfriados con el objetivo de ser capaces de construir un radiómetro completo en futuros proyectos. Por tanto, el proyecto Planck puede considerarse como la semilla de esta tesis.

Si se considera el diagrama de bloques de un receptor mostrado en la Fig. 1.3, en el cual cada subsistema está caracterizado por su ganancia G y su temperatura de ruido T_e , entonces la temperatura de ruido total del sistema viene dado por la ecuación de Friis (1.2).

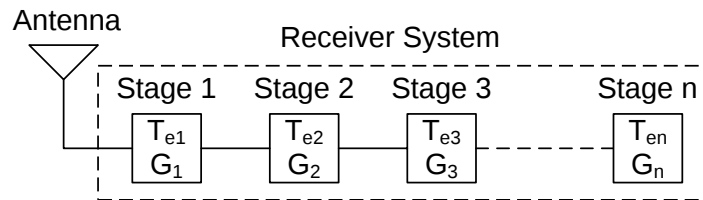


Fig. 1.3. Diagrama de bloques de un sistema receptor genérico.

$$T_{sys} = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{T_{en}}{G_1 \cdot \dots \cdot G_{n-1}} \quad (1.2)$$

² Actualmente el DICOM únicamente realiza tareas de soporte sobre sus diseños en el proyecto Planck.

Para minimizar T_{sys} el primer elemento en el receptor debería ser un subsistema con alta ganancia y muy bajo ruido. Por esta razón se usan amplificadores criogénicos en los módulos anteriores donde son enfriados hasta temperaturas criogénicas.

Los amplificadores criogénicos se usan ampliamente en los centros de radio astronomía de todo el mundo donde alcanzan los mejores resultados actuales. La Figura 1.4 muestra el estado del arte en amplificadores criogénicos hasta 50 GHz (actualizado a 2009) junto con la predicción de medida de ruido³ hecha por M. W. Pospieszalski en 1992 [1.7].

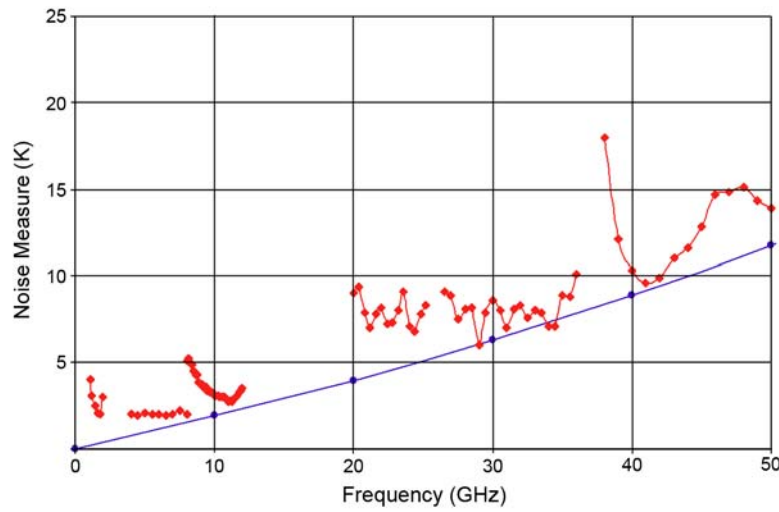


Fig. 1.4. Comparación entre la predicción de la medida de ruido mínima de un HFET criogénico de 100 nm de longitud de puerta (1992) en azul, y los mejores resultados publicados hasta 2009 para amplificadores criogénicos en rojo [1.8].

Esta tesis, iniciada en 2005, recoge los primeros pasos del DICOM en el campo de la criogenia y se centra en el diseño de amplificadores criogénicos como el más importante componente dentro de los receptores criogénicos. El diseño de este tipo de amplificadores requiere solucionar muchos aspectos previos relacionados con la tecnología criogénica; por tanto, este trabajo cubre estos conceptos con detalle de forma que proporciona una base sólida de conocimiento para futuros desarrollos en el DICOM.

³ La medida de ruido es una figura de mérito más adecuada cuando se consideran amplificadores de varias etapas. Tiene en cuenta no solo el ruido del dispositivo sino también su ganancia asociada. La medida de ruido mínima de un amplificador de un número infinito de etapas viene dada por (1.3) [1.9].

$$M_{\min} = \left(\frac{T_n}{1 - \frac{1}{G_a}} \right)_{\min} \quad (1.3)$$

Donde T_n es la temperatura de ruido y G_a la ganancia disponible del amplificador.

1.4. Estructura del Trabajo

Al comienzo de esta tesis el primer criostato adquirido por el DICOM se había recibido recientemente y estaba todavía empaquetado en su caja original. A partir de ese momento se encararon y resolvieron muchos problemas diferentes relacionados con la criogenia permitiendo el diseño y medida de amplificadores criogénicos y otros subsistemas relacionados. Este documento recoge todo el trabajo realizado durante estos años y presenta los resultados más significativos divididos en los siguientes capítulos.

El Capítulo II detalla el proceso de configuración de la instalación criogénica disponible en el laboratorio del DICOM hoy en día. Actualmente el DICOM posee dos sistemas criogénicos totalmente operativos los cuales han sido diseñados e instalados durante este trabajo. El capítulo presenta los cálculos básicos necesarios para diseñar estos sistemas, ofrece consejos prácticos para conseguir un buen funcionamiento, y da las modificaciones requeridas para adaptar su funcionamiento a las aplicaciones de microondas.

El amplio campo de la medida de parámetros de microondas en ambientes criogénicos se cubre en el Capítulo III. El capítulo proporciona algunas alternativas para medir los parámetros de Scattering (parámetros-S) y la temperatura de ruido de sistemas enfriados. Este capítulo se centra en la técnica del atenuador frío para medir el ruido y presenta un detallado análisis de la incertidumbre de la medida con esta técnica. Además se incluye el diseño de un nuevo atenuador que mejora la precisión en la medida de ruido.

El Capítulo IV es la base para los diseños de amplificadores criogénicos que se abordan en los dos siguientes capítulos. Este capítulo estudia el efecto de las bajas temperaturas en los dispositivos de microondas, especialmente sobre los transistores basados en tecnología de fosfuro de indio (InP). Este estudio abarca medidas DC y de parámetros-S además de las características de ruido en función de la temperatura y de la estructura del dispositivo.

El diseño y caracterización de los amplificadores criogénicos que se han realizado a lo largo de este trabajo se presentan en los Capítulos V y VI. En el primero se diseña un amplificador en banda-Ka con tecnología híbrida (MIC) usando transistores discretos de InP; en el segundo capítulo se diseña otro amplificador en banda-Ka pero en tecnología monolítica (MMIC) usando transistores metamórficos de arseniuro de galio. Las ventajas y desventajas de ambas tecnologías se pueden apreciar a partir de estos dos capítulos.

El Capítulo VII presenta otros subsistemas comúnmente utilizados en los receptores de radio astronomía. Primero se da una pequeña introducción a los receptores de radio astronomía, y después se muestra el diseño y caracterización de algunos componentes como ortomodos, moduladores polares y módulos posteriores realizados para el proyecto QUIJOTE (un proyecto terrestre que comenzó en 2007 con el objetivo de estudiar la polarización del CMB).

Finalmente, el Capítulo VIII resume los principales resultados obtenidos a lo largo de la tesis, además de presentar las principales conclusiones que se extraen de este documento y ofrecer algunas direcciones futuras con las que continuar el presente trabajo.