

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^a 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

Acknowledgements

Most of all I need to thank my advisors Luisa de la Fuente and Eduardo Artal for supervising me in this Thesis. They gave me the opportunity of working on the Planck project. I am grateful for their help in my microwave education and learning. Their encouragement and patience throughout the duration of this work are invaluable. Both trusted me and gave me such a nice environment that made this work possible.

I would like to thank Juan Pablo Pascual and Marco Dettrati for their collaboration and contributions in the project and their immensely helpful comments, criticisms and suggestions.

I would also like to gratefully acknowledge Neil Roddis y Danielle Kettle for giving me the opportunity of working with them in Jodrell Bank and for transmitting me their knowledge and considerable experience about microwave receivers. It was a pleasure to work with them.

I wish to thank Alexandrina Pana y Eva Cuerno for the assembly of all the circuits and subsystems. Their time, dedication, and care are greatly appreciated.

I estimate the contribution of Angel Mediavilla in the design and development of all the mechanical designs, which were essential for the assembly of all the circuits.

In addition, I would like to thank Pedro de Paco and Lluis Pradell for the design and supply of several detectors.

I am grateful to Nerea Otegi and Juan Mari Collantes for some helpful discussions about noise.

I would also like to thank other members and colleagues of the Ingeniería de Comunicaciones department and particularly those who have helped me during these years in the simulation and measurement laboratories.

I wish to acknowledge the effort of many dedicated people to the development of the Planck radiometers.

Lastly, thanks to my family and close friends.

This Thesis has been developed in the frame of the following research projects:

- Project Title: Diseño y montaje del prototipo de los amplificadores del "Back-End" a 30 y 44 GHz de la misión Planck de la ESA.
Reference: ESP98-1545-E
Funding Agency: Plan Nacional de I+D. Programa Nacional de Investigación Espacial.
Duration from: 16/05/99 to: 31/01/00
- Project Title: Módulos Posteriores de los Radiómetros a 30 y 44 GHz de Planck.
Reference: 1FD97-1769-C04-02(ESP)
Funding Agency: Plan Nacional de I+D. Programa Nacional de Investigación Espacial. FEDER.
Duration from: 1/02/00 to: 31/12/01
- Project Title: Radiómetros de la misión Planck a 30 y 44 GHz.
Reference: ESP2001-4543-PE
Funding Agency: (Plan Nacional de I+D+I).
Duration from: 1/01/02 to: 31/12/02

Acknowledgements

- Project Title: Radiómetros de la misión Planck a 30 y 44 GHz.
Reference: ESP2002-04141-C03-03
Funding Agency: (Plan Nacional de I+D+I).
Duration from: 1/10/02 to: 31/10/04
- Project Title: Radiómetros de la misión Planck a 30 y 44 GHz: Integración y Calibración.
Reference: ESP2004-07067-C03-02
Funding Agency: (Plan Nacional de I+D+I).
Duration from: 13/12/04 to: 13/12/07

Índice

Acknowledgements.....	i
Índice	iii
Acrónimos	ix
Símbolos	xi
Resumen	xv
Abstract.....	xvii

Capítulo 1

Introducción.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS	2

Chapter 1

Introduction	3
1.1. INTRODUCTION	3
1.2. THESIS STRUCTURE.....	4

Capítulo 2

Principios de Radiometría – La Misión Planck.....	5
2.1. INTRODUCCIÓN	5
2.2. PRINCIPIOS DE RADIOMETRÍA	6
2.2.1. Descripción general de un radiómetro	6
2.3. TIPOS DE RADIÓMETROS.....	7
2.3.1. Receptor de potencia total	7
2.3.2. Sensibilidad con inestabilidades	9
a) <i>Ruido 1/f.....</i>	9
b) <i>Efecto sobre las prestaciones del radiómetro</i>	9
2.3.3. Receptor de Dicke	10
2.3.4. Radiómetro de correlación.....	11
2.4. LA MISIÓN PLANCK.....	12
2.4.1. Datos del satélite Planck	13
2.4.2. Componentes de la misión Planck	14

2.4.3. El instrumento de baja frecuencia (LFI).....	14
a) Subsistemas del LFI	16
b) Funcionamiento del LFI.....	16
2.5. ESTADO DE LA TÉCNICA DE LOS AMPLIFICADORES DE BAJO RUIDO	16
2.6. CONCLUSIONES	17

Capítulo 3

Estudio del Radiómetro del Instrumento de Baja Frecuencia de Planck.....	19
3.1. INTRODUCCIÓN.....	19
3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS RADÍÓMETROS DEL LFI.....	19
3.3. ESTUDIO DE UN RECEPTOR DE LOS RADÍÓMETROS DEL LFI.....	21
3.3.1. Factor de modulación de ganancia, r	24
3.4. ANÁLISIS DE POTENCIAS	28
3.4.1. BEM de 30 GHz.....	28
3.4.2. BEM de 44 GHz.....	28
3.5. CONCLUSIONES	29

Capítulo 4

Diseño y Caracterización de Amplificadores de Bajo Ruido MMIC.....	31
4.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	31
4.2. TECNOLOGÍA	31
4.2.1. Proceso ED02AH	32
4.2.2. Análisis del transistor de modo deplexión para bajo ruido	32
4.3. MÉTODO DE REALIMENTACIÓN INDUCTIVA	36
4.4. MÉTODO DE REALIMENTACIÓN PARALELA	39
4.4.1. Matriz de Scattering de un transistor realimentado	41
a) Círculos de ganancia en potencia	42
4.4.2. Método de diseño	42
4.5. REDES DE ADAPTACIÓN.....	46
4.6. LNA MMIC BANDA KA.....	46
4.6.1. LNA MMIC de 4 Etapas	46
a) Diseño	46
b) Análisis de Montecarlo.....	48
c) Estructura y tamaño del MMIC.....	50
d) Caracterización.....	50
4.6.2. LNA MMIC Banda Ka de 3 Etapas	52
a) Diseño	52
b) Análisis de Montecarlo.....	53
c) Estructura y tamaño del MMIC.....	54
d) Caracterización.....	54
4.7. LNA MMIC BANDA Q DE 4 ETAPAS	56
4.7.1. Diseño	56
4.7.2. Análisis de Montecarlo.....	57
4.7.3. Estructura y tamaño del MMIC	58
4.7.4. Caracterización	59
a) Parámetros de Scattering y ruido.....	60
b) Compresión	61
4.7.5. Oblea para los equipos de vuelo	62
4.7.6. Modificación del circuito	62
a) PCM	62
b) TCV	63
c) Medidas eléctricas a temperatura ambiente y selección de los circuitos	63
d) Inspección SEM y evaluación de la fiabilidad	64
e) Resultados de las medidas eléctricas	65

4.8. COMPARACIÓN LOS AMPLIFICADORES MONOLÍTICOS DE BAJO RUIDO CON TRANSISTORES DE DEPLEXIÓN Y DE ENRIQUECIMIENTO EN LA BANDA Q	66
4.8.1. Estudio de los transistores E-HEMT y D-HEMT	66
4.8.2. Comparación entre dos LNA con diferente tipo de transistores	68
4.9. CONCLUSIONES	69

Capítulo 5

Amplificador Bajo Ruido Híbrido de Banda Ancha en Tecnología GaAs.....	71
5.1. INTRODUCCIÓN	71
5.2. DISPOSITIVO ACTIVO	71
5.3. ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD	73
5.3.1. Definición de los parámetro S_L y S_S	74
a) Parámetro S_L	75
b) Parámetro S_S	76
5.3.2. Definición del parámetro S_F	77
5.4. DISEÑO DE UN AMPLIFICADOR DE UNA ETAPA.....	78
5.4.1. Redes de adaptación	78
a) Ondas de superficie.....	78
b) Resonancias Transversales para línea microstrip	80
c) Límites de adaptación	80
5.4.2. Amplificador de una etapa.....	82
5.5. DISEÑO DE UN AMPLIFICADOR BAJO RUIDO MULTIESTAPA	84
5.5.1. Redes de adaptación	85
5.5.2. Redes de Polarización.....	86
5.6. FABRICACIÓN DEL CIRCUITO	88
5.7. CARACTERIZACIÓN DEL AMPLIFICADOR.....	90
5.8. CONCLUSIONES.....	93

Capítulo 6

Módulos Posteriores del Radiómetro Planck.....	95
6.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	95
6.2. MÓDULO POSTERIOR DE 30 GHz	95
6.2.1. Transición “Ridge” de guía rectangular a microstrip banda Ka	96
6.2.2. Amplificadores de Bajo Ruido	100
a) Análisis de estabilidad como una red de tres puertos	103
6.2.3. Filtro Paso banda	106
a) Diseño	106
b) Caracterización.....	106
6.2.4. Red de ecualización	107
6.2.5. Detector	108
a) Diseño	108
b) Caracterización.....	108
6.2.6. Amplificador de continua de bajo ruido	109
a) Diseño	109
b) Caracterización.....	110
6.2.7. Circuitos de corriente continua	111
a) Regulador.....	111
b) Circuito de protección	111
6.2.8. Prototipos del Módulo posterior a 30 GHz	112
6.3. MÓDULO POSTERIOR DE 44 GHz	113
6.3.1. Transición “ridge” de guía rectangular a microstrip banda Q	113
6.3.2. Amplificadores de Bajo Ruido	115
6.3.3. Filtro Paso banda	116
a) Diseño	116
b) Caracterización.....	116

6.3.4. Detector	117
a) <i>Diseño</i>	117
b) <i>Caracterización</i>	117
6.3.5. Atenuadores microstrip	118
a) <i>Estudio teórico y diseño</i>	118
b) <i>Atenuadores microstrip de 3 dB</i>	125
c) <i>Atenuadores microstrip de 5 dB</i>	129
d) <i>Atenuadores microstrip de 13 dB</i>	130
6.3.6. Amplificador de continua de bajo ruido	132
6.3.7. Circuitos de continua	132
a) <i>Reguladores</i>	132
b) <i>Circuitos de protección</i>	132
6.3.8. Prototipos del Módulo posterior a 44 GHz	134
6.4. MÓDULOS POSTERIORES CONSTRUIDOS EN MIER COMUNICACIONES	137
6.5. CONCLUSIONES	138

Capítulo 7

Caracterización de los Módulos Posteriores del Radiómetro Planck	141
7.1. INTRODUCCIÓN	141
7.2. ANCHO DE BANDA EFECTIVO	141
7.2.1. Desadaptación entre Subsistemas – Parámetro D	142
a) <i>Dos Redes en Cascada</i>	142
b) <i>Tres redes en cascada</i>	147
7.2.2. Medidas de diferentes interconexiones	148
a) <i>Transición coplanar (Alúmina) a Duroid</i>	148
b) <i>Transición línea impedancia de 50 Ohm microstrip Alúmina-Duroid</i>	149
7.2.3. Ancho de banda efectivo en un sistema con detección	150
7.3. MEDIDA DE LA TEMPERATURA DE RUIDO	151
7.3.1. Método del Factor Y	152
7.3.2. Temperatura de Ruido de un Sistema de Banda Ancha	153
7.3.3. Método de la Fuente Fría (“Cold Source”)	156
7.3.4. Aplicación de los métodos de medida de ruido	157
a) <i>Medida con el método del factor Y</i>	157
b) <i>Medida con el método de la fuente fría “Cold Source”</i>	158
7.4. CONSIDERACIONES EN LA MEDIDA DE TEMPERATURA DE RUIDO	158
7.4.1. Linealidad y rango dinámico	158
a) <i>Rango dinámico y sensibilidad de señal tangencial (TSS) del detector</i>	158
b) <i>Temperatura de Ruido del Detector</i>	159
7.4.2. Exceso de Ruido	160
7.5. PARÁMETROS DE RUIDO, DESADAPTACIÓN DE ENTRADA Y G_{AV} DE LA LÍNEA DE ENTRADA	162
7.6. LINEALIDAD	163
7.7. PROCEDIMIENTOS DE MEDIDAS	164
7.7.1. Equipos de RF	164
a) <i>Parámetros de Scattering</i>	164
b) <i>Figura de ruido</i>	164
7.7.2. Equipos con detector integrado	165
a) <i>Adaptación de entrada</i>	165
b) <i>Respuesta RF a DC y linealidad</i>	165
c) <i>Espectro de ruido de baja frecuencia</i>	166
d) <i>Consumo de potencia</i>	166
e) <i>Temperatura de ruido</i>	166
7.8. MÓDULO POSTERIOR DE 30 GHz	166
7.8.1. Prototipos de RF	166
a) <i>Consumo</i>	166
b) <i>Parámetros de Scattering</i>	167
c) <i>Figura de ruido</i>	167
7.8.2. Prototipos con detector integrado	167
a) <i>Consumo</i>	167
b) <i>Adaptación de entrada</i>	167

c) Respuesta de RF a DC	168
d) Respuesta de Pin-V _{out}	169
e) Temperatura equivalente de ruido	170
f) Ruido 1/f.....	171
7.9. MÓDULO POSTERIOR DE 44 GHz.....	172
7.9.1. Prototipos de RF	172
a) Consumo	172
b) Parámetros de Scattering.....	173
c) Figura de ruido	173
7.9.2. Prototipos con detector integrado	175
a) Consumo	175
b) Adaptación de entrada	176
c) Respuesta de RF a DC	176
d) Respuesta de Pin-V _{out}	177
e) Temperatura equivalente de Ruido	178
f) Ruido 1/f.....	183
7.10. CONCLUSIONES	184

Capítulo 8

Radiómetro Completo.....	185
8.1. INTRODUCCIÓN	185
8.2. FRONT-END MODULE A 30 GHz.....	185
8.2.1. Acopladores híbridos.....	185
8.2.2. Amplificadores de Bajo Ruido	186
8.2.3. Conmutadores de fase.....	186
8.2.4. Rama del FEM.....	187
8.2.5. Caracterización del FEM	188
8.3. BACK-END MODULE A 30 GHz	189
8.4. FUNCIONAMIENTO Y MEDIDAS DEL RADIÓMETRO A 30 GHz.....	190
8.4.1. Operación del radiómetro	191
a) Linealidad y curva de calibración	191
8.4.2. Fugas y temperatura de ruido del sistema.....	191
8.4.3. Sistema de Adquisición de Datos	194
8.4.4. Ancho de Banda Efectivo	196
8.4.5. Estabilidad	196
a) Frecuencia de codo 1/f(definición)	196
b) Factor 'r' de Modulación de Ganancia	198
8.5. FRONT-END MODULE A 44 GHz.....	199
8.5.1. Acopladores híbridos.....	199
8.5.2. Amplificadores de Bajo Ruido	199
8.5.3. Conmutadores de fase.....	200
8.5.4. Rama del FEM.....	200
8.5.5. Caracterización del FEM	200
8.6. BACK-END MODULE A 44 GHz	201
8.7. FUNCIONAMIENTO Y MEDIDAS DEL RADIÓMETRO A 44 GHz.....	201
8.7.1. Operación del radiómetro	202
8.7.2. Aislamiento y temperatura de ruido del sistema.....	202
8.7.3. Ancho de Banda Efectivo	203
a) Modificación de la polarización del FEM	204
8.8. MARGEN DINÁMICO DE LOS MÓDULOS POSTERIORES	204
8.9. CONCLUSIONES	207

Capítulo 9

Conclusiones	209
9.1. INTRODUCCIÓN	209

9.2. AMPLIFICADORES DE BAJO RUIDO.....	209
9.3. MÓDULOS POSTERIORES.....	210
9.4. CARACTERIZACIÓN.....	210
9.5. LÍNEAS FUTURAS.....	211
Chapter 9	
Conclusions	213
9.1. INTRODUCTION	213
9.2. LOW NOISE AMPLIFIERS	213
9.3. BACK-END MODULES.....	214
9.4. CHARACTERIZATION.....	214
9.5. FUTURE LINES.....	215
Publicaciones relacionadas con la Tesis	
REVISTAS INTERNACIONALES	217
CONGRESOS INTERNACIONALES	217
CONGRESOS NACIONALES	218
Anexo A	
Esquemas de una Rama de los Módulos Posteriores del Radiómetro Planck	221
A.1. INTRODUCCIÓN	221
A.2. RAMA DEL MÓDULO POSTERIOR DE 30 GHz.....	221
A.2.1. Regulador positivo	222
A.2.2. RF y circuitos de protección	222
A.2.3. Detector.....	223
A.2.4. Amplificador de continua.....	224
A.3. MÓDULO POSTERIOR DE 44 GHz	224
A.3.1. Regulador positivo	225
A.3.2. Regulador negativo	225
A.3.3. Parte de RF y circuitos de polarización y protección.....	226
A.3.4. Detector.....	228
A.3.5. Amplificador de continua.....	228
A.3.6. Atenuadores microstrip	229
Referencias	231

Acrónimos

ADS: Advanced Design System
GaAs: Gallium Arsenide
BE: Bottom Electrode
BEM: Back End Module
BNC: Bayonet Navy Connector
BPF: Band Pass Filter
CAD: Computer Aided Design
CMB: Cosmic Microwave Background
COBE: Cosmic Microwave Background Explorer
CW: Continuous Wave
DAE: Data Acquisition Electronics
dB: Decibel
dBm: Decibel referenced to the power of 1 milliwatt
DC: Direct Current
DUT: Device under test
EBB: Elegant Breadboard
ENR: Excess Noise Ratio
ESA: European Space Agency
FEM: Front End Module
FET: Field Effect Transistor
FEU: Front-End Unit
FH: Feed Horns
FM: Flight Model
GHz: Gigahertz
HEB: Hot Electron Bolometer
HEMT: High Electron Mobility Transistor
HFI: High Frequency Instrument
HFSS: High Frequency Structure Simulator
Hz: Hertz
InP: Indium Phosphide
JBO: Jodrell Bank Observatory
JGRVZM: Jointly Gaussian Random Variables with Zero Mean
kHz: kilohertz

Acrónimos

LFI: Low Frequency Instrument
LNA: Low Noise Amplifier
LPF: Low Pass Filter
MHEMT: Metamorphic High Electron Mobility Transistor
MHz: Megahertz
MIC: Microwave Integrated Circuit
MMIC: Monolithic Microwave Integrated Circuit
MSG: Maximum Stable Gain
MTTF: Mean Time to Failure
NF: Noise Figure
NGST: Northrop Grumman Space Technology
N-ON: Normally ON
N-OFF: Normally OFF
mA: Milliamp
MDS: Minimum Detectable Signal
MDS: Microwave Design System
MOVPE: Metal Organic Vapour Phase Epitaxy
MSD: Minimum Stable Distance
OMT: OrthoMode Transducer
PCB: Printed Circuit Board
PCM: Process Control Monitor
PHEMT: Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor
QM: Qualification Model
RAA: Radiometer Array Assembly
REBA: Radiometer Electronics Box Assembly
RF: Radiofrequency
r.p.m.: revolution per minute
SCS: Sorption Cooler Subsystem
SIS: Superconductor-Insulator-Superconductor
SMA: SubMiniature version A
SOLT: Short Open Load Thru
SOTA: State Of The Art
TCV: Technology Characterization Vehicle
TE: Transverse Electric
TEM: Transverse Electromagnetic
TM: Transverse Magnetic
TSS: Tangential Signal Sensitivity
TRL: Thru Reflect Line
WMAP: Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Símbolos

Símbolo	Unidades	Descripción
A		Constante de normalización para las fluctuaciones de temperatura de ruido
$A_{\text{feed-OMT}}$		Pérdidas de la bocina más el ortomodo
A_{LPF}		Amplitud del filtro paso bajo
A_{4K}		Pérdidas de la conexión de la carga de referencia al híbrido
a_{BPF}		Pérdidas de tensión de los filtros paso banda del BEM
a_d		Pérdidas de tensión de los desfasadores del FEM
a_h		Pérdidas de tensión de los híbridos del FEM
a_{WGi}		Pérdidas de tensión de las guías de onda que unen el FEM y el BEM
B	Hertzio (Hz)	Ancho de Banda
B_{LF}	Hertzio (Hz)	Ancho de banda equivalente de ruido de un filtro paso bajo
B_{3dB}	Hertzio (Hz)	Ancho de banda 3 dB de un filtro paso bajo
C_{gs}	Faradio (F)	Capacidad puerta-fuente
C_{gd}	Faradio (F)	Capacidad puerta drenador
C_j	Faradio (F)	Capacidad de la unión de un diodo
C_p	Faradio (F)	Capacidad parásita paralela
C_w		Centro del círculo de ganancia en potencia
C_{sL}		Centro del círculo de estabilidad a la salida
C_{ss}		Centro del círculo de estabilidad a la entrada
c	Metro/Segundo (m/seg)	Velocidad de la luz en el vacío ($3 \cdot 10^8$ m/s)
D		Factor de desadaptación
D_i		Distancia del centro del círculo de estabilidad al centro de la Carta de Smith
D_{i_1}		Distancia del centro del círculo de estabilidad a un coeficiente de reflexión dentro de la zona estable
$E[x]$		Valor esperado de x
F	-	Factor de ruido
F_{ij}		Factor de estabilidad para una red de tres accesos
F_{\min}	-	Factor de ruido mínimo
f	Hertzio (Hz)	Frecuencia
f_c	Hertzio (Hz)	Frecuencia de corte del modo TE para ondas de superficie
f_{knee}	Hertzio (Hz)	Frecuencia de codo del ruido con espectro 1/f
f_o	Hertzio (Hz)	Frecuencia central
f_s	Hertzio (Hz)	Frecuencia de corte de la onda de superficie
f_{switch}	Hertzio (Hz)	Frecuencia de comutación de fase del desfasador
f_t	Hertzio (Hz)	Frecuencia de transición de un transistor
f_{TE}	Hertzio (Hz)	Frecuencia de corte del modo TE para resonancias transversales en microstrip
f_{TM}	Hertzio (Hz)	Frecuencia de corte del modo TM para ondas de superficie en microstrip
G		Ganancia
G_{av}		Ganancia disponible

Símbolo	Unidades	Descripción
G_{DC}		Ganancia de tensión de los amplificadores de continua
G_w		Ganancia en potencia
G_t		Ganancia de transferencia de potencia
g_B		Ganancia de tensión de los amplificadores de bajo ruido del BEM
g_F		Ganancia de tensión de los amplificadores bajo ruido de FEM
g_m	Siemens (S)	Transconductancia
h	Milímetro (mm)	Grosor del sustrato
$h(t)$		Respuesta al impulso
I_d	Amperio (A)	Corriente de drenador
I_{DC}	Amperio (A)	Corriente de continua rectificada del diodo
I_s	Amperio (A)	Corriente de saturación del diodo
K		Factor de estabilidad de Rollet para una red de dos accesos
$K_3(\Gamma_K)$		Factor de estabilidad para una red de tres accesos
k	Julio/Kelvin (J/K)	Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
L	Metro (m)	Longitud
L_{fb}	Henrio (H)	Inductancia de realimentación paralela
L_d	Henrio (H)	Inductancia en la línea de drenador para la realimentación paralela
L_p	Henrio (H)	Inductancia parásita paralela
M		Medida de ruido
M_i		Factor de desadaptación
M_{min}		Medida de ruido mínimo
N_{cold}	Vatio (W)	Potencia de ruido con la fuente de ruido apagada
N_d		Número de dedos de puerta de un transistor
NF	Decibelio (dB)	Figura de ruido
NF_{min}		Figura de ruido mínimo
N_{hot}	Vatio (W)	Potencia de ruido con la fuente de ruido encendida
N_s		Número de etapas de los amplificadores
n		Factor de idealidad de diodo
n_B		Tensión de ruido añadido por los amplificadores bajo ruido
n_{BPF}		Tensión de ruido añadido por los filtros paso banda
n_d		Tensión de ruido de los desfasadores del FEM
n_F		Tensión de ruido añadido por los amplificadores bajo ruido del FEM
n_{Hi}		Tensión de ruido térmico añadido por los híbridos del FEM
n_{WGi}		Tensión de ruido añadido por las guías de onda que unen el FEM y el BEM
P_A	Vatio (W)	Potencia de la antena
P_{AC}	Vatio (W)	Potencia de alterna
P_{avs}	Vatio (W)	Potencia disponible del generador
P_{in}	Vatio (W)	Potencia de entrada
P_{inBEM}	Vatio (W)	Potencia de entrada al BEM
P_N	Vatio (W)	Potencia de ruido disponible
P_L	Vatio (W)	Potencia entregada a la carga
Q		Factor de calidad
q	Culombio (C)	Carga del electrón (-1.6×10^{-19} C)
R	Ohmio (Ω)	Resistencia
$R_d(\tau)$		Autocorrelación a la salida del detector
R_{ds}	Ohmio (Ω)	Resistencia de drenador-fuente
R_{fb}	Ohmio (Ω)	Resistencia de realimentación paralela
R_g	Ohmio (Ω)	Resistencia de puerta
$R_i(\tau)$		Autocorrelación a la entrada del detector
R_j	Ohmio (Ω)	Resistencia de la unión de un diodo
R_n	Ohmio (Ω)	Resistencia de ruido
R_s	Ohmio (Ω)	Resistencia serie parásita del diodo
R_s	Ohmio (Ω)	Resistencia de fuente
R_{sL}		Radio del círculo de estabilidad a la salida
R_{sq}	Ohmio/cuadro (Ω/sq)	Resistencia por cuadro

Símbolos

Símbolo	Unidades	Descripción
R_{ss}		Radio del círculo de estabilidad a la entrada
R_v	Ohmio (Ω)	Resistencia de video
R_w		Radio del círculo de ganancia en potencia
r		Coeficiente de modulación de ganancia
r_n		Resistencia de ruido normalizada a Z_o
T	Kelvin (K)	Temperatura ambiente
T_A	Kelvin (K)	Temperatura de la antena
T_B	Kelvin (K)	Temperatura equivalente de ruido del BEM
T_{cold}	Kelvin (K)	Temperatura de ruido de la fuente de ruido apagada
T_e	Kelvin (K)	Temperatura equivalente de ruido a la entrada
T_F	Kelvin (K)	Temperatura equivalente de ruido del FEM
T_{hot}	Kelvin (K)	Temperatura de ruido de la fuente de ruido encendida
T_{load}	Kelvin (K)	Temperatura de la carga de referencia
T_o	Kelvin (K)	Temperatura de ruido estándar de referencia (290 K)
T_{phys}	Kelvin (K)	Temperatura física
T_R	Kelvin (K)	Temperatura de ruido del receptor
T_{ref}	Kelvin (K)	Temperatura de ruido de la carga de referencia a la entrada del híbrido
T_S	Kelvin (K)	Temperatura del cielo a la entrada del híbrido
T_{sky}	Kelvin (K)	Temperatura del cielo (2.7 K)
T_{sys}	Kelvin (K)	Temperatura de ruido del sistema
$\tan\delta$		Tangente de pérdidas
S		Matriz de Scattering
$S(f)$	Vatio/Hertzio (W/Hz)	Densidad espectral de potencia
S_{ijrf}		Matriz de Scattering con resistencia de realimentación paralela R_{fb}
S_F		Parámetro de estabilidad condicional a la entrada y a la salida
S_L		Parámetro de estabilidad condicional a la entrada
S_S		Parámetro de estabilidad condicional a la salida
t	Micrómetro (μm)	Grosor del conductor
V_{cold}	Voltio (V)	Tensión detectada debida a la fuente de ruido apagada
V_d	Voltio (V)	Tensión de drenador
v_d	Voltio (V)	Tensión a la salida del detector cuadrático
V_{det}	Voltio (V)	Tensión detectada
V_{DC}	Voltio (V)	Tensión de continua
v_{do}	Voltio (V)	Tensión diferencia a la salida del radiómetro
V_g	Voltio (V)	Tensión de puerta
V_{hot}	Voltio (V)	Tensión detectada debida a la fuente de ruido encendida
v_i	Voltio (V)	Tensión a la entrada del detector
v_o	Voltio (V)	Tensión a la salida
V_{out}	Voltio (V)	Tensión a la salida
V_{outoff}	Voltio (V)	Tensión a la salida debida al ruido
v_{ref}	Voltio (V)	Tensión de la señal de referencia
v_{shot}	Voltio (V)	Tensión de ruido de disparo (shot)
v_S	Voltio (V)	Tensión de la señal del cielo
v_Σ	Voltio (V)	Suma de tensiones de ruido
W	Micrómetro (μm)	Anchura de puerta de un transistor
W_u	Micrómetro (μm)	Anchura del dedo unidad de puerta de un transistor
X_s	Ohmio (Ohm)	Reactancia de realimentación serie en fuente
Y		Factor Y
Y		Matriz de admitancias
Z	Ohmio (Ω)	Impedancia
Z_s	Ohmio (Ω)	Impedancia de realimentación serie de la fuente
Z_L	Ohmio (Ω)	Impedancia de la carga
Z_o	Ohmio (Ω)	Impedancia característica
α	Voltio/Vatio (V/W)	Constante de sensibilidad del detector
β	Radian/segundo (rad/s)	Constante de fase

Símbolos

Símbolo	Unidades	Descripción
Γ		Coeficiente de reflexión
Γ_L		Coeficiente de reflexión en la carga
Γ_{\min}		Coeficiente de reflexión de la entrada que da la M_{\min}
Γ_{opt}		Coeficiente de reflexión óptimo de ruido a la entrada que da la F_{\min}
Γ_S		Coeficiente de reflexión en la fuente
Δ		Determinante de la matriz
Δ_3		Determinante de la matriz de parámetros S de tres accesos
Δf	Hertzio (Hz)	Incremento de frecuencia
Δ_{ij}		Cofactor de los elementos (i, j)
ΔT	Kelvin (K)	Sensibilidad radiométrica
ΔT_{\min}	Kelvin (K)	Mínima Sensibilidad radiométrica
ΔV	Voltio eficaz (V_{rms})	Valor eficaz de la tensión de ruido blanco
δ		Función delta de Dirac
ϵ_{eff}		Constante dieléctrica efectiva
ϵ_0	Faradio.metro (farad/m)	Permitividad eléctrica del vacío ($8.85 \cdot 10^{-12}$ farad/m)
ϵ_r		Constante dieléctrica relativa
λ	Metro (m)	Longitud de onda
μ	Henrio.metro	Permeabilidad magnética
$\mu (\text{MU})$		Factor de estabilidad para una red de dos accesos
μ_3		Factor de estabilidad para una red de tres accesos
μ_0	Henrio.metro	Permeabilidad magnética en el espacio libre ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Henrio/m)
σ	Siemens.metro (S/m)	Conductividad
τ	Segundo (s)	Tiempo de integración equivalente
Φ	Grado ($^\circ$)	Longitud eléctrica de una línea
ϕ_i	Grado ($^\circ$)	Fases introducidas por cada uno de los desfasadores del FEM
ϕ_B	Grado ($^\circ$)	Desfases introducidos por los amplificadores bajo ruido del BEM
ϕ_{BPF}	Grado ($^\circ$)	Desfases introducidos por los filtros paso banda del BEM
ϕ_F	Grado ($^\circ$)	Desfases introducidos por los amplificadores bajo ruido del FEM
ω	Radian/segundo (rad/s)	Frecuencia angular

Resumen

Planck es el telescopio de la ESA (European Space Agency) destinado al estudio del origen del Universo. Se concentrará en el estudio de la ‘primera luz’ que viajó libremente por el Universo, apenas unos 300.000 años después del Big Bang, este tiempo es pequeño si se tiene en cuenta que la edad actual del cosmos ronda los 13.500 millones de años. Esa ‘primera luz’ se llama ‘radiación de fondo de microondas’ y es perceptible aún hoy en día en todo el cielo. Analizando esta luz con un detalle sin precedentes, Planck podrá responder muchas de las dudas que aún quedan sobre cómo empezó y evolucionó el Universo. Se trata de la radiación más antigua detectable con información sobre el pasado. El telescopio Planck se lanzará conjuntamente con el satélite Herschel de la ESA, pero se separarán poco después de forma que cada uno realice su misión.

En la práctica, Planck trabajará midiendo la temperatura del cielo. La radiación medida por el instrumento es ‘traducible’ a temperatura. Las variaciones de temperatura son las que contienen información sobre cómo era el universo en su origen; se trata de variaciones minúsculas: del orden de millonésimas de grado. Como consecuencia los detectores de Planck son de altísima sensibilidad y trabajarán a temperaturas muy bajas, porque de otro modo sus propias emisiones de calor enmascararían las medidas.

Varios institutos científicos españoles participan en el desarrollo de dichos detectores. La Universidad de Cantabria (UC), la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), participan en el Instrumento de baja frecuencia (LFI - Low Frequency Instrument). El IAC es responsable del sistema de control digital del instrumento y del procesado de la señal que registra el instrumento a bordo.

La Universidad de Cantabria es la responsable de construir los módulos posteriores (BEM – Back End Module) de los radiómetros de LFI en las bandas de 30 y 44 GHz, en colaboración con la Universidad Politécnica de Cataluña. La empresa encargada de fabricar los equipos de vuelo es Mier Comunicaciones (La Garriga – Barcelona).

Los módulos frontales (FEM – Front End Module) de los radiómetros en esas mismas bandas de frecuencia, se desarrollan en el Observatorio Jodrell Bank de la Universidad de Manchester en Inglaterra (UK), con los cuales se ha tenido una estrecha colaboración, realizando medidas de integración de diferentes prototipos. Los FEM contienen la parte más sensible de los receptores, y funcionan enfriados a 20 Kelvin con el fin de reducir el ruido del sistema y mejorar su sensibilidad.

Los módulos posteriores reciben las señales provenientes de los módulos frontales, a través de una entrada en guía de onda, y se encargan de amplificar, filtrar y detectar dichas señales. De modo que un módulo posterior tiene entradas de radiofrecuencia y salidas de continua. Un BEM completo está formado por cuatro ramas idénticas, cada una de ellas está formada por dos amplificadores de bajo ruido, un filtro paso banda, un diodo detector y un amplificador de continua. En cada rama de los BEM han sido necesarios dos amplificadores en cascada para conseguir la ganancia requerida. El primer elemento funcional de todos los BEM es una transición de guía de onda a microstrip usando una guía de tipo “Ridge”.

El objetivo de la presente Tesis ha sido el análisis, diseño y caracterización de los amplificadores de bajo ruido y banda ancha en tecnología de GaAs PHEMT con aplicación a los módulos posteriores del radiómetro. Se han realizado diseños de circuitos amplificadores en tecnología MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) y en tecnología MIC (Microwave Integrated Circuit) en las bandas Ka y Q. Posteriormente se han realizado diversos prototipos de módulos posteriores, donde se han integrado parte de los amplificadores diseñados, y se han desarrollado técnicas de medida específicas para su caracterización.

Toda la tecnología desarrollada, con la información sobre los diseños, construcción y caracterización de los prototipos de los módulos posteriores realizados ha sido transferida a la industrial espacial, para la producción de los equipos de vuelo.

Esta Tesis se compone de las siguientes partes:

- Introducción y estudio del funcionamiento del radiómetro del instrumento de baja frecuencia de Planck
- Diseño y caracterización de amplificadores de bajo ruido utilizando tecnología de GaAs. Se presentan diseños MMIC en la banda Ka y en la banda Q, y un diseño MIC en la banda Q.
- Diseño y construcción de los módulos posteriores en las bandas de 30 y 44 GHz. Se presentan varios prototipos fabricados en ambas bandas, así como medidas de cada uno de los subsistemas que los forman.
- Desarrollo de técnicas de medida para receptores de banda ancha con detección directa y su aplicación a la caracterización de los módulos posteriores, mostrando el funcionamiento de los prototipos representativos para las dos bandas de frecuencia.
- Integración de los módulos posteriores con los módulos frontales y presentación de algunos de los resultados de medida de los radiómetros completos.

Abstract

ESA's (European Space Agency) Planck telescope is devoted to study the origin of the Universe. It will be concentrated on studying the "first light" that could ever travel freely throughout the Universe, 300.000 years after the Big Bang. This time is short taking into account that the current cosmos is around 13.500 millions of years old. The remnant of that "first light" is the radiation of the Cosmic Microwave Background (CMB) and nowadays it is detectable in the whole sky. With a detailed analysis of that light and with an accuracy never achieved before, Planck will answer many currently doubts about the birth and evolution of the Universe. This is the 'oldest' radiation detectable and carries information about the past. The Planck telescope will be launched together with ESA's Herschel satellite. After launch, Planck and Herschel will separate.

In practice, Planck will work testing the sky temperature. The radiation can be translated into temperature. The temperature variations contain information about how the origin of the Universe was. Those variations are minute amounts around millionth of a degree. As a consequence, the Planck detectors will have to be highly sensitive and will have to work at temperatures very close to the absolute zero; otherwise their own emission of heat will spoil the measurements.

Several Scientific Spanish Institutes participate in those detectors development. The Universidad de Cantabria (UC), the Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) and the Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), participate in the Low Frequency Instrument (LFI). The IAC is responsible of the digital control for the instrument and the processing of the signal registered on board.

The Universidad de Cantabria is the responsible of building the Back End Modules (BEM) of the LFI radiometers at 30 and 44 GHz, in collaboration with the Universidad Politécnica de Cataluña. The Spanish company Mier Comunicaciones (La Garriga – Barcelona) has manufactured the Flight Models (FM).

The Front End Modules (FEM) of the radiometers at the same frequency range are developed at Jodrell Bank Observatory from University of Manchester in England (UK). A close collaboration with them has been carried out, performing integration and tests of different prototypes. The FEM contains the most sensitive part of the receiver and it operates at 20 K to reduce the system noise and to improve its sensitivity.

The back end modules receive the signal coming from the front end modules, through a waveguide input, and they amplify, filter and detect those signals. The back end module has RF inputs and DC outputs. A BEM is composed of four identical branches and each one comprises two low noise amplifiers, one band pass filter, a diode detector and a DC amplifier. Two identical MMIC low noise amplifiers have been cascaded in order to provide the necessary gain. A waveguide to microstrip transition was designed using a stepped "Ridge" waveguide and it is the first functional element of the BEM.

The goal of this Thesis has been the analysis, design and characterization of broadband low noise amplifiers in GaAs PHEMT technology with application to the radiometer back end modules. Ka-band and Q-band amplifier designs using MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) technology and MIC (Microwave Integrated Circuit) technology have been developed. Subsequent several back-end module prototypes have been designed and manufactured, where the low noise amplifiers have been integrated. Measurement techniques for the whole BEM characterization have been developed.

Abstract

All the developed technology and design, assembly and characterization information about the back end module prototypes performed have been transferred to the space industry in order to manufacture the flight back end modules.

The Thesis is composed of the next parts:

- Introduction and study about the radiometer of the Planck low frequency instrument
- Design and characterization of low noise amplifiers using GaAs technology. Ka-band MMIC designs and Q-band MMIC and MIC design are presented
- Design and assembly of the 30 and 44 GHz back end modules. Several prototypes have been manufactured in both frequency bands and the most representative test results of each subsystem is presented
- Development of measurement techniques for broadband direct detection receivers and their application to the characterization of the back end modules. Performance of representative prototypes in both frequency bands are included
- Integration of the back end modules and front end modules and significant results of the tests for a radiometer in each frequency band