

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

Capítulo 9

Conclusiones

9.1. Introducción

Se han presentado los amplificadores de bajo ruido, que forman parte de los módulos posteriores del radiómetro Planck en la banda de 30 y 44 GHz. Por otro lado el desarrollo de dichos módulos con su diseño, construcción y caracterización también ha sido una parte importante de esta Tesis.

A continuación se detallan los principales resultados obtenidos.

9.2. Amplificadores de Bajo Ruido

Varios amplificadores de bajo ruido, en tecnologías monolítica e híbrida han sido diseñados y caracterizados. Todos ellos fueron diseñados con aplicación a los módulos posteriores de los radiómetros de 30 y 44 GHz de la misión Planck. La tecnología de los dispositivos utilizados fue de Arseniuro de Galio con transistores pseudomórficos de alta movilidad electrónica (PHEMT).

En la realización de los circuitos amplificadores MMIC se ha desarrollado una técnica de diseño para etapas con realimentación paralela que permite conseguir ganancia plana en anchos de banda grandes. Este método consiste en obtener los elementos de realimentación para que, en un ancho banda determinado, los círculos de ganancia en potencia a todas las frecuencias de la banda y con un mismo valor de ganancia, pasen por el centro de la carta de Smith. De este modo con una carga de 50 Ohm a la salida y una red de adaptación a la entrada, se obtiene el mismo valor de ganancia en todas las frecuencias. Conocidos los elementos de realimentación y realizando únicamente el diseño de la red de adaptación de entrada se pueden encadenar varias etapas en cascada.

Se ha empleado la tecnología MMIC ED02AH de bajo ruido para la realización de varios amplificadores de bajo ruido en la banda Ka y en la banda Q. Estos amplificadores han sido diseñados aplicando la técnica de realimentación de fuente en las primeras etapas y la técnica de realimentación paralela, con el método propuesto, en las etapas finales.

Se ha realizado un estudio de los transistores de modo enriquecimiento y de modo depleción en la misma tecnología, ED02AH. Utilizando la misma topología de diseño, se ha realizado la comparación de dos amplificadores de bajo ruido MMIC, cada uno de ellos diseñado con un tipo de transistores diferentes (uno de ellos con transistores de modo enriquecimiento y el otro con transistores de modo depleción). Con ambos amplificadores se han conseguido valores de ganancia y ruido similares, pero el realizado con transistores de modo enriquecimiento con un consumo de corriente continua más bajo. La desventaja de este último es que la compresión a la salida se produce para valores de potencia de salida más bajos que para el amplificador realizado con transistores de modo depleción.

Se ha realizado el diseño y construcción de un amplificador de bajo ruido para la banda Q en tecnología MIC utilizando un transistor PHEMT de GaAs comercial. El amplificador de tres etapas ha mostrado un comportamiento bueno de ruido. El valor de ruido medio en la banda fue de 1.8 dB con una ganancia de 16.5 dB desde 38 hasta 48 GHz.

Para el diseño de etapas amplificadoras condicionalmente estables, se han propuesto dos parámetros que permiten conocer en el plano de entrada o en el plano de salida de una red de dos accesos, si una determinada impedancia se encuentra en zona inestable dentro de la carta de Smith. El cálculo de estos parámetros evita tener que dibujar los círculos de estabilidad para comprobar la zona en la que se encuentra dicha impedancia.

9.3. Módulos Posteriores

En este trabajo se describe el principio de operación, montaje y funcionamiento de los módulos posteriores (BEM) a 30 y 44 GHz del instrumento de baja frecuencia de Planck. Estos incluyen transiciones de guía de onda a microstrip, amplificadores de bajo ruido con transistores PHEMT de GaAs, filtros paso banda, detectores cuadráticos y amplificadores de continua. Se han descrito los fundamentos del diseño y construcción de los módulos posteriores, así como la caracterización de todos los subsistemas que lo forman.

Los amplificadores de bajo ruido que fueron utilizados en los módulos posteriores de la banda de 30 GHz se han caracterizado como una red de tres accesos y se ha analizado su estabilidad. La estabilidad de los amplificadores de microondas de bajo ruido se analiza generalmente a través de la caracterización de los parámetros de Scattering como una red de dos accesos. El análisis estabilidad se ha extendido para una red de tres accesos. Para analizar el amplificador, se ha utilizado su contacto de alimentación como el tercer acceso. Con los parámetros de Scattering de la red de tres accesos se ha obtenido información adicional sobre el aislamiento entre los puertos de RF y los puertos de DC. El análisis completo de la estabilidad ha permitido predecir y evitar posibles problemas de oscilación causados por las líneas de alimentación.

Se presentan las expresiones y criterios de diseño de atenuadores microstrip de banda ancha. Mediante el estudio teórico de atenuadores microstrip de banda ancha se han obtenido expresiones analíticas para su diseño. Estos atenuadores están formados por líneas microstrip de impedancia 50 Ohm y resistencias de capa fina en cascada, sin la necesidad de agujeros metalizados. La elección de la longitud eléctrica adecuada entre resistencias permite obtener buena adaptación en anchos de banda grandes. El funcionamiento de estos atenuadores se ha demostrado mediante el diseño, fabricación y caracterización de varios atenuadores con diferentes valores de atenuación y realizados por diferentes fabricantes.

Se han construido varios prototipos de módulos posteriores tanto en la banda Ka como en la banda Q, cuyos diseños han dado lugar a la fabricación de modelos de calificación y de vuelo que han sido integrados en el sector industrial. Para el diseño de los módulos posteriores se han tenido en cuenta tanto objetivos científicos como tecnológicos. Del mismo modo se ha considerado que se trataba de diseños que iban ser para equipos de vuelo, con una serie de requerimientos de calificación necesarios para transferir toda la información, para su posterior fabricación en el sector industrial espacial.

9.4. Caracterización

Para la caracterización de los módulos posteriores construidos se han desarrollado técnicas de medida y de cálculo de los parámetros más relevantes, tales como la temperatura equivalente de ruido y el ancho de banda efectivo, teniendo en cuenta que se trata de un sistema receptor con detección directa.

Los módulos posteriores están formados por varios subsistemas en cascada. La función de transferencia total de las diferentes redes en cascada va a depender de la adaptación que exista entre ellas. La desadaptación generalmente produce un aumento de rizado en la banda y la reducción del ancho de banda efectivo. Se ha definido el parámetro de desadaptación, D , a partir de los parámetros de Scattering de dos redes, que permite conocer el ancho de banda efectivo que van a proporcionar una vez colocadas en cascada. Si la desadaptación que se tiene entre dos subsistemas es de banda estrecha, se puede seleccionar una línea microstrip ente ellos, con una determinada fase para mejorar el ancho de banda efectivo. Para minimizar el efecto de la desadaptación en banda ancha se pueden añadir atenuadores microstrip. El método ha sido aplicado a los dos amplificadores en cascada del BEM de la banda Q.

La definición del ancho de banda efectiva se ha extendido para el caso de tener un sistema con un detector cuadrático integrado. De este modo se incluye en el cálculo la respuesta de la sensibilidad del detector. Utilizando un generador de señal de onda continua y barriendo un tono con una potencia a la entrada, por

encima del nivel de ruido del receptor y por debajo del nivel de saturación, se puede obtener la función de transferencia de todo el módulo posterior, y a continuación realizar el cálculo de su ancho de banda efectivo.

Para la obtención de la temperatura equivalente de ruido de los módulos posteriores a temperatura ambiente se ha presentado un método basado en el método del factor Y usando fuentes de ruido comerciales. Cuando los sistemas son de banda ancha a frecuencias de microondas, en general se dispone de fuentes de ruido con un exceso de ruido que no es plano a lo largo de la banda de interés. Se ha incluido la dependencia con la frecuencia de la fuente de ruido y la función de transferencia del receptor, en la definición del factor Y. Esta dependencia frecuencial es especialmente relevante para los sistemas radiométricos de potencia total con banda ancha y trabajando a temperatura ambiente. El método se ha validado usando un simulador comercial (ADS de Agilent) y varias medidas realizadas sobre los módulos posteriores de radiómetro Planck, ya que éstos pueden ser considerados como radiómetros de potencia total y caracterizarse como radio receptores de conversión directa.

Para realizar pruebas de integración del radiómetro, previas a las de los modelos de vuelo, los prototipos de los módulos posteriores se han integrado en el Observatorio Radioastronómico de Jodrell Bank (Manchester, Inglaterra) con los módulos frontales que allí se han desarrollado. Se ha realizado la caracterización de un radiómetro completo tanto de 30 como de 44 GHz.

9.5. Líneas Futuras

El trabajo que se ha presentado en esta tesis podría continuarse en dos líneas diferentes. La primera de ellas relacionada con la labor de diseño que se ha realizado. La segunda se refiere a las técnicas de medida desarrolladas para la caracterización de los módulos posteriores del radiómetro y de cada uno de los circuitos que lo forman.

Desde el punto de vista de diseño sería interesante seguir el trabajo en el empleo de nuevas tecnologías basadas en GaAs, como las tecnologías metamórficas, por ser éstas quizás el futuro más viable en procesos de bajo ruido y potencia. Con estas tecnologías se consigue un compromiso entre prestaciones y robustez, lo que hace de ellas una excelente apuesta para futuros diseños de amplificadores bajo ruido. Si nos focalizamos en el comportamiento en ruido y consumo, la tecnología basada en dispositivos HEMT sobre InP es hoy en día la que mejores prestaciones está consiguiendo en frecuencias milimétricas y submilimétricas, con lo que sería interesante utilizar esta tecnología para diseños de amplificadores bajo ruido y comparar sus resultados a los de la tecnología metamórfica.

En todos los diseños de amplificadores que se han presentado en esta tesis, se ha utilizado la técnica de realimentación paralela para conseguir ganancia plana en grandes anchos de banda. Otras técnicas de diseño, como la llamada adaptación resistiva, permitirían hacer una comparación en cuanto a ganancia y ancho de banda con las técnicas empleadas. Por otro lado obtener modelos mejorados a frecuencias de ondas milimétricas de los elementos disponibles para el diseño de los amplificadores en tecnología MMIC, permitiría realizar diseños más precisos, intentando evitar por ejemplo los desplazamientos en la frecuencia que han ocurrido en los diseños de los amplificadores presentados.

En relación a las técnicas de medida empleadas, sería interesante obtener los parámetros de ruido de los receptores de microondas empleados en la caracterización en ruido de los amplificadores bajo ruido, para de esta forma obtener unas medidas con mucha mayor precisión, en las que se puedan eliminar gran parte de los errores sistemáticos. Una continuación en esta línea consistiría en obtener los parámetros de ruido de los dispositivos activos utilizados en los diseños para extraer su modelo de ruido tanto a temperatura ambiente como enfriados. En este sentido, sería interesante caracterizar los amplificadores diseñados a temperaturas criogénicas. Por otro lado sería importante realizar un análisis de la incertidumbre y errores de medida en la caracterización de la temperatura de ruido del BEM, pudiendo estimar la precisión en las medidas con las técnicas empleadas.

Por último y desde el punto de vista de radiometría, sería interesante la caracterización de los espectros de baja frecuencia de los dispositivos activos y trabajar en diseños de amplificadores que minimicen la frecuencia de codo y confieran mayor estabilidad en ganancia y ruido, parámetros muy importantes en receptores de alta sensibilidad.

Chapter 9

Conclusions

9.1. Introduction

Low noise amplifiers for the Planck radiometer back end modules at 30 and 44 GHz have been presented. On the other hand, the development of those modules, with their design, assembly and characterization has been also an important issue in this project.

The following are the main obtained results.

9.2. Low Noise Amplifiers

Several low noise amplifiers in MMIC and MIC technology have been designed and characterized. All of them were designed with application to the back end modules of the Planck radiometers at 30 and 44 GHz. The chosen technology in all the circuits was GaAs.

A design technique for parallel feedback stages has been developed and it has been applied to the design of the MMIC low noise amplifiers. This technique allows getting flat gain in a wide bandwidth. The method consists of obtaining the feedback elements, in order to have the same output gain power circles crossing the centre of the Smith chart in a frequency band. Then a 50 Ohm output load and an input matching network provide the same gain value in a bandwidth. Once the parallel feedback elements are obtained and with design of only an input matching network, several stages can be cascaded.

ED02AH MMIC low noise technology has been employed in several low noise amplifiers at Ka and Q bands. These amplifiers have been designed using the series feedback technique in the first stages and the parallel feedback in the last stages, using the proposed design technique.

A study about depletion and enhancement mode transistors from the ED02AH technology has been carried out. Two MMIC low noise amplifiers using the same design topology, but different transistor type (one depletion mode transistor and the other enhancement mode transistors), have been compared. Both amplifiers have provided similar gain and noise, but the circuit with enhancement mode transistors had the lowest current consumption. This last one has the disadvantage of having a lower output compression point in comparison with the circuit with depletion mode transistors.

A design and assembly of a Q-band MIC low noise amplifiers have been carried out using a commercial PHEMT GaAs transistor. A three stage amplifier showed a good noise performance. The average noise temperature in the band was 1.8 dB with an associated gain of 16.5 dB from 38 up to 48 GHz.

In order to design conditionally stable stages, two parameters have been proposed. Their value for a two port networks show when an impedance is in the unstable region of the Smith chart at the output or input plane.

The calculation of these parameters avoids drawing the stability circles in order to verify the zone of that impedance.

9.3. Back-End Modules

This work describes the principle of operation, assembly and performance of the 30 and 44-GHz Back-End Module (BEM) for the Planck Low Frequency Instrument (LFI). They include waveguide to microstrip transition, GaAs Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor (PHEMT) low noise amplifiers (LNA), band pass filter, square-law detector and DC amplifier. The fundamentals of the design of the RF part are described and all of the components have been tested individually before integration.

The 30 GHz BEM amplifiers were characterized as a three port network and its stability has been analysed. The stability of microwave amplifiers is normally analysed as a two port network. An amplifier has at least a third port for biasing that might be considered for stability. This analysis has been extended to a three port network. Full stability analysis of the millimetre wave MMIC amplifier has been carried out using a three port Scattering parameter test. Additional information about isolation between RF and DC ports has been obtained. This complete stability analysis provides bias line impedance conditions to assure stable operation of the amplifier.

The design expressions and criteria of microstrip attenuators have been described. The theoretical study of the broadband microstrip attenuators has provided analytical expressions for their design. These attenuators are comprised of cascaded 50 Ohm impedance microstrip lines and thin film resistor, without via holes. The electrical length of the microstrip lines determines the matching achieved in wide bandwidths. The performance of the attenuators has been demonstrated through the design and test of several attenuators with several attenuations and from two different manufacturers.

Several back end module prototypes at Ka and Q bands have been built. Their design brought the manufacturing of qualification and flight models built in the industry. Scientific and technological objectives have been taken into account during their design. Moreover it was considered that the design will be for flight units, with qualification requirements and the need of being transferred to the space industrial sector.

9.4. Characterization

Measurement and calculation techniques of the most important parameters, such as equivalent noise temperature and effective bandwidth, have been developed in order to characterise the back end modules, taking into account that they are direct detect receivers.

The modules consist of several cascaded subsystems. The final transfer function depends on the matching between them. The mismatch in cascaded two ports is a common cause of ripple increase and effective bandwidth reduction in broadband systems. A mismatch factor, D , is defined to deal with the individual S_{21} and global S_{21} parameters in a cascaded network. The relationship between this D factor and effective bandwidth has been presented. For a narrow band mismatching the effective bandwidth can be improved choosing the suitable electrical length of the microstrip line to connect two subsystems. Mismatching effect in wide bandwidth can be minimized using microstrip attenuators. The method has been applied to the Q band broadband amplifiers of the BEM, based on two cascaded multistage MMIC amplifiers. Effective bandwidth has been improved inserting the series thin film resistor attenuator.

The effective bandwidth definition has been extended to a system with an integrated square-law detector. The detector sensitivity versus frequency has been included. Using a continuous wave signal generator and sweeping a tone with an input power, higher than the receiver noise and lower than saturation, the back end transfer function can be obtained, and then the effective bandwidth can be calculated.

In order to obtain the back end module equivalent noise temperature, a method based on the Y-factor and using commercial noise sources, has been presented. In general when testing a microwave broadband system noise temperature, the available noise sources have an excess noise ratio that decreases with the frequency. This dependence on frequency and the receiver transfer function have been included in the Y-factor definition. The dependence on frequency is especially relevant for total power radiometers with a wide bandwidth and working at room temperature. The method has been validated using a commercial simulator (ADS - Agilent) and several measurements carried out with the BEM, because this can be considered as a total power radiometer and be characterized as a direct conversion radio receiver.

Tests of the radiometer integration, before the flight models, have been performed with 30 and 44 GHz BEM prototypes at Jodrell Bank Observatory from University of Manchester in England (UK), where the FEM are developed.

9.5. Future lines

The work presented in this Thesis can continue with two different lines. First of them is related to design aspects. Second it refers to measurement techniques developed to characterise the radiometer back end modules and their circuits.

From the design point of view it would be interesting to continue this work employing new technologies based on GaAs, as the metamorphic, maybe one of the most suitable in future low noise and power processes. These technologies provide a trade off between performance and robustness which means an excellent choice for future low noise amplifier designs. In relation to noise performance and power consumption the technology based on InP HEMT has currently the best performance at millimetre and submillimetre frequencies, which implies that it is an interesting technology to design low noise amplifiers and to compare the achieved results to those obtained with metamorphic technology.

The amplifier designs presented in this Thesis are based on the parallel feedback technique to achieve flat gain throughout a wide band. Other design techniques, as lossy match, could be used to compare the obtained gain and bandwidth with the employed techniques. On the other hand improved models of the available MMIC technology elements to design amplifiers at millimetre wave frequencies, will allow to perform accurate designs, trying to avoid a frequency shift as the presented amplifiers have shown.

Concerning the measurement techniques, it would be interesting to obtain the noise parameters of the microwave receivers used to characterise the noise of the low noise amplifiers. Then more accurate measurements could be obtained and systematic errors could be removed. A continuation would consist of obtaining noise parameters of the active devices used to design the low noise amplifiers, to extract their model at room and cryogenic temperatures. In this way, it would be interesting to characterise the designed low noise amplifiers at cryogenic temperatures. On the other hand it would be important to analyze the uncertainty and measurement errors during the equivalent noise temperature characterization of the BEM, estimating the measurement accuracy with the applied techniques.

Finally from the radiometry point of view, it would be interesting to characterise low frequency spectrum of the active devices and to work on low noise amplifier designs to minimize the knee frequency to have noise and gain stability, which are very important parameter in high sensitivity receivers.

