

Módulo Posterior del Radiómetro Planck a 30 GHz: Modelo de Calificación

B. Aja, E. Artal, M.L. de la Fuente, J.P.

Pascual, A. Mediavilla

Departamento de Ingeniería de
Comunicaciones.

Universidad de Cantabria

beatriz@dicom.unican.es

M. Bara, E. Blanco

División Espacio.

Mier Comunicaciones S.A.

mbara@mier.es

L. Pradell, P. de Paco

Departamento de Teoría de la Señal y
Comunicaciones.

Universidad Politécnica de Cataluña

pradell@tsc.upc.es

Abstract- The Back End Module at 30 GHz for the Planck mission has been manufactured in its Qualification Model version. Design, integration and main performances are described. Electrical, thermal and vibration tests, already done for space qualification, are summarised. This module consists basically in four identical branches based on broadband low noise amplification, direct detection and video amplification.

I. INTRODUCCIÓN

La misión científica Planck de la Agencia Europea del Espacio (ESA), consiste en la puesta en órbita de un satélite que contendrá radiómetros a diferentes frecuencias del margen de las ondas milimétricas y submilimétricas [1]. Su lanzamiento está previsto para el año 2007. Llevará dos instrumentos, el de baja y el de alta frecuencia. El primero se basa en radiómetros diferenciales y tiene tres bandas de recepción: 30, 44 y 70 GHz. Cada cadena radiométrica consta de dos partes, el módulo frontal y el módulo posterior. El módulo frontal tiene amplificadores de muy bajo ruido, enfriados a 20 K, con tecnología de transistores HEMT de InP. La amplificación en el módulo posterior se realiza con tecnología de transistores HEMT de AsGa a temperatura ambiente (aproximadamente 300 K).

El desarrollo de los módulos posteriores a 30 y 44 GHz está a cargo de la Universidad de Cantabria, con la colaboración de la Universidad Politécnica de Cataluña, siendo la empresa Mier Comunicaciones S.A. quien fabrica los modelos de calificación y de vuelo, realizando además las pruebas de dichas unidades antes de ser entregadas para la integración en el satélite. El diseño del módulo posterior (Back End Module: BEM) ha producido diversas versiones, con diversos grados de integración: la fase de prototipos de laboratorio, después una primera versión integrable (Elegant Breadboard: EBB), hasta llegar a una versión representativa del modelo de calificación (representative Qualification Model: QM-rep). En esta comunicación se describe la versión final del modelo de calificación (QM), donde ha habido una muy importante contribución de la empresa Mier Comunicaciones S.A. en la concepción mecánica y distribución de la circuitería interna de la unidad. La unidad fabricada ya se ha entregado al consorcio Planck-LFI para las pruebas de integración del radiómetro de 30 GHz.

II. ESQUEMA Y FUNCIONAMIENTO

A. Diagrama de bloques.

El esquema básico del módulo posterior (BEM) se muestra en la Figura 1. En cada BEM hay cuatro ramas, correspondientes a dos radiómetros, la figura muestra de hecho la mitad de un BEM.

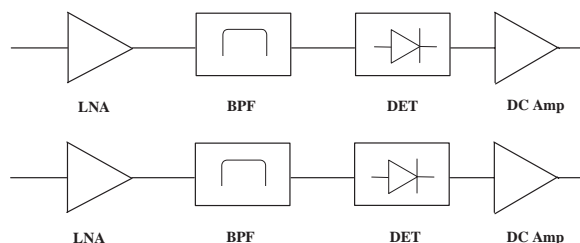


Fig. 1. Diagrama de bloques de la mitad del BEM de 30 GHz.

Los amplificadores de bajo ruido (LNA) proporcionan una ganancia mayor de 30 dB, con un factor de ruido menor de 3 dB en una banda relativa mayor del 20 %. El filtro paso banda (BPF) sirve para fijar en gran medida el ancho de banda efectivo de todo el radiómetro. El detector (DET) convierte directamente la señal de microondas a corriente continua. El amplificador de video (DC Amp) fija el valor de la tensión continua a la salida del BEM.

B. Subsistemas

Cada amplificador de bajo ruido (LNA) consiste en dos amplificadores MMIC en cascada, modelo HMC263 de Hittite. Es un monolítico de alta ganancia en la banda de 24 a 36 GHz, con cuatro etapas, en tecnología GaAs PHEMT. Se conectan a líneas microstrip de Alúmina de 0.254 mm de grosor y 9.9 de constante dieléctrica. La estructura interna del MMIC es autopolarizada, sin necesidad de usar tensiones separadas para drenadores y puertas. Las redes de polarización externas incluyen condensadores cerámicos planos de 100 pF para desacoplo. La ganancia del LNA es mayor de 30 dB en toda la banda (de 26.5 a 33.5 GHz).

El filtro paso banda está realizado con líneas acopladas en microstrip con sustrato Duroid 6002 de 0.254 mm de

grosor y 2.92 de constante dieléctrica. Es de orden 3 y tiene pérdidas inferiores a 0.84 dB en la banda de paso.

El detector está construido con un diodo Schottky sin polarizar (zero bias), en montaje “beam lead”, modelo HSCH-9161 de Agilent. El circuito está realizado en microstrip, en el sustrato de Alúmina antes citado y tiene a la entrada una red híbrida resistiva (100 Ohm) y de adaptación para conseguir el ancho de banda deseado. La tensión continua de salida está desacoplada de la señal de RF mediante una línea microstrip de tipo radial y un filtro RC (100 KOhm y 300 pF en paralelo). La sensibilidad del detector es superior a 1000 mV/mW.

El amplificador de corriente continua proporciona una salida equilibrada, es decir terminales (+) y (-) no referidos a masa, mediante la combinación de dos amplificadores operacionales (modelos OP27 y OP200). El primero es de baja tensión de “offset” y de bajo ruido. La ganancia se fija eligiendo adecuadamente pares de valores fijos de resistencias, compatibles con un bajo consumo.

III. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

El módulo posterior del radiómetro de 30 GHz de la misión Planck actúa como un convertor de señal de microondas a señal de corriente continua, por lo que no es posible su caracterización exclusivamente en términos de radiofrecuencia, por ejemplo con magnitudes como la ganancia de RF o el factor de ruido con la frecuencia. Cada una de las ramas del BEM es un convertor RF a DC con ganancia de conversión fija. Las características eléctricas principales se describen a continuación.

A. Respuesta RF a DC

La señal de entrada al BEM proviene del módulo frontal y es básicamente ruido amplificado, dado que la señal recibida por la antena es de un nivel muy bajo: la temperatura de radiación cósmica de fondo de microondas es de unos 2.7 K, por lo que predomina el ruido añadido por el propio receptor. La potencia de entrada al BEM será aproximadamente de -60 dBm. Para la caracterización de la respuesta global (entrada de RF a salida de DC) se usa una señal de barrido en frecuencia. La figura 2 muestra la respuesta típica de uno de los canales del BEM.

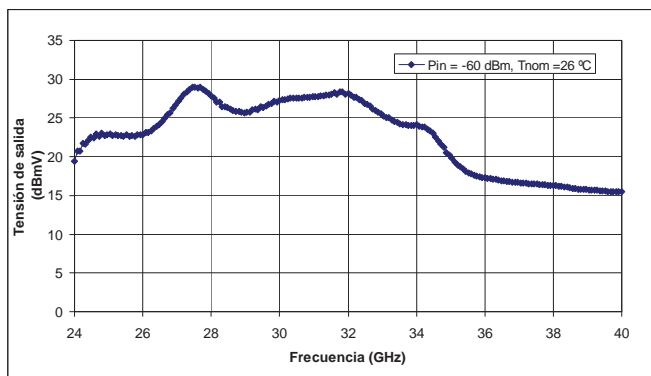


Fig. 2. Respuesta RF-DC.

B. Ancho de banda efectivo

El ancho de banda efectivo de todo el radiómetro viene principalmente determinado por el BEM, que es donde se usa un filtro paso banda. Es un parámetro muy importante pues cuanto mayor sea mejor será la sensibilidad del radiómetro. Las especificaciones de los radiómetros de Planck marcan un ancho del 20% para el radiómetro completo. Esto obliga a que el BEM tenga un ancho efectivo mayor, dado que al integrarlo con el resto de subsistemas siempre se reduce debido a los rizados en las respuestas y a las desadaptaciones de impedancia.

El ancho de banda efectivo se define [2] como:

$$BW_{eff} = \frac{\left| \int G(f) df \right|^2}{\int |G(f)|^2 df} \quad (1)$$

donde $G(f)$ es la ganancia de potencia de RF del BEM, incluyendo la respuesta de RF del detector. Los valores obtenidos de las medidas de las cuatro ramas del BEM están alrededor de 8.8 GHz.

C. Temperatura equivalente de ruido

La temperatura equivalente de ruido se obtiene a partir del factor Y, que es la relación entre las tensiones detectadas de salida cuando la fuente de ruido está caliente (ON) y fría (OFF). Si la fuente de ruido utilizada en la medida no tiene un valor de exceso de ruido constante con la frecuencia, debe calcularse la temperatura corrigiendo este efecto [3]. La temperatura de ruido de cualquiera de las cuatro ramas ha sido menor de 300 K, medida a temperatura ambiente.

D. Espectro de salida y ruido 1/f

El radiómetro diferencial basa su funcionamiento en la conmutación de señal entre una carga de referencia (temperatura de 4 K) y la señal del cielo. Esta conmutación se realiza en el módulo frontal. La frecuencia de conmutación es de 4096 Hz. La señal que sale del BEM es por lo tanto una señal de esa frecuencia, parecida a una onda cuadrada pero de aspecto ruidoso. Tanto el detector como el amplificador de continua deben proporcionar un ancho de banda suficiente para que la señal de salida no pierda parte de la información de su espectro. El ancho requerido es de al menos 50 KHz, los valores medidos en las cuatro ramas del BEM han sido mayores de 74 KHz.

Uno de los aspectos críticos de los radiómetros de Planck es la influencia del ruido de muy baja frecuencia, de espectro 1/f. El esquema diferencial permite cancelar en gran medida este ruido, que de otra forma ocultaría por completo la señal de fondo cósmico que se pretende observar. Aunque el ruido del BEM se cancela en el proceso de conmutación, es necesario que este ruido solamente esté presente bastante por debajo de la frecuencia de conmutación. En caso contrario no podría cancelarse. El valor requerido de la frecuencia de codo del ruido 1/f es que sea menor de 1 KHz. Los valores medidos en el BEM están todos por debajo de 200 Hz. La medida se realiza con un analizador de espectros de baja frecuencia observando el espectro de la señal de salida del BEM. La figura 3 muestra un espectro típico de la salida de una rama del BEM.

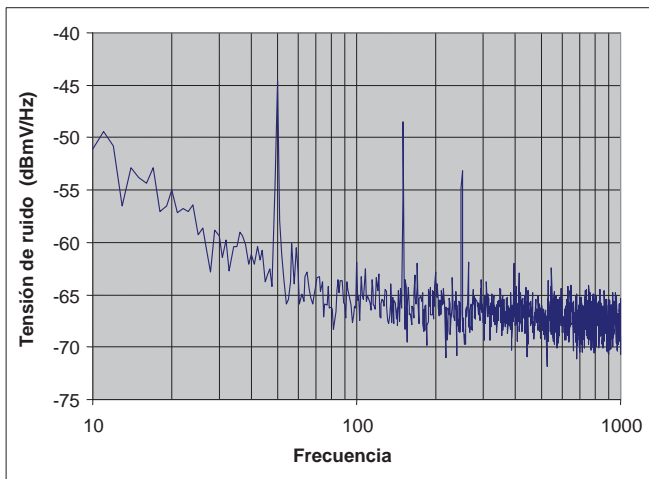


Fig. 3. Densidad espectral a la salida del BEM

IV. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Las limitaciones impuestas a las dimensiones y masa del BEM han obligado a hacer una importante labor de integración, disponiendo los distintos circuitos en diferentes niveles, de forma que sean compatibles con las entradas en guía de onda y con las orientaciones adecuadas de los conectores múltiples de salida de señal y entradas de tensiones de polarización.

A. Integración de los subsistemas del BEM

El aspecto exterior frontal del BEM es el mostrado en la figura 4. Se observan las cuatro entradas en guía de onda rectangular WR-28. Las dimensiones son: ancho = 60 mm, alto = 39 mm, largo = 65,5 mm.

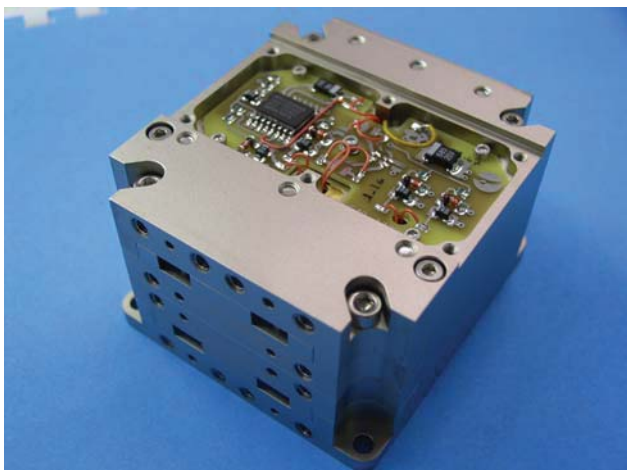


Fig. 4. Aspecto externo del BEM de 30 GHz (vista frontal)

En la figura 5 se muestra una vista posterior del BEM cerrado con los dos conectores múltiples, ambos de 9 pines. Un conector es para la salida de las señales detectadas y el otro para la entrada de los +5 y -5 Volt de polarización.



Fig. 5. Aspecto externo del BEM de 30 GHz (vista posterior)

En la integración se han usado cinco niveles para los circuitos:

1. Reguladores de tensión (2 canales)
2. Cadena de RF y detector (2 canales)
3. Amplificadores de continua (4 canales)
4. Cadena de RF y detector (2 canales)
5. Reguladores de tensión (2 canales)

En la anterior figura 4, BEM abierto, se ve el circuito impreso del primer nivel (reguladores de tensión).

B. Portador de radiofrecuencia

Los circuitos microstrip de la cadena de RF están montados en un portador especial, de forma que el cerramiento rectangular no permita la propagación de modos guiados.

La figura 6 muestra una fotografía de la cadena de RF de dos canales. Se puede observar, a la izquierda, el extremo de la transición de guía rectangular a microstrip, realizado con guía "ridge" escalonada.

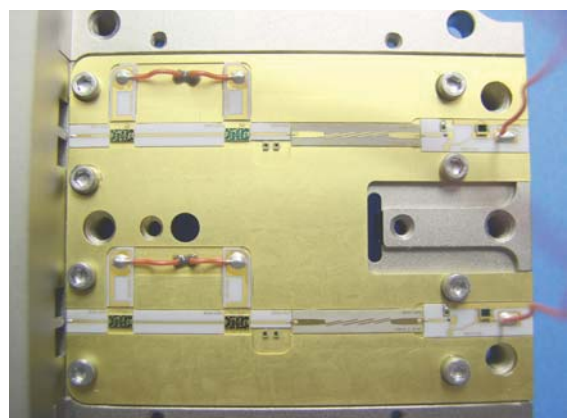


Fig. 6. Portador de RF: Cadena de RF y detector para dos canales

C. Circuitos de alimentación y amplificadores de continua

El BEM recibe desde el exterior dos tensiones de alimentación, + 5 Volt y -5 Volt. Para la polarización de los MMIC se usa un regulador positivo que da una tensión de +3

Volt. Los amplificadores operacionales del amplificador de continua se polarizan directamente con los ± 5 Volt. Para proteger a los MMIC de posibles picos de sobretensión se han incluido redes RC con un diodo zener, para asegurar que nunca llegarán tensiones elevadas a los transistores internos de los MMIC.

V. PRUEBAS DE CALIFICACIÓN

El módulo fabricado se ha sometido a las pruebas de calificación que determina la ESA para equipos embarcados, siguiendo las especificaciones particulares de la misión Planck-LFI.

A. Pruebas eléctricas

Las pruebas eléctricas realizadas incluyen: respuesta de RF a DC, adaptación a la entrada, temperatura equivalente de ruido, ancho de banda de la señal de salida, frecuencia de codo del ruido $1/f$, impedancia de salida y consumo de corriente continua. Estas medidas se han realizado a tres temperaturas (baja, nominal y alta: 0 °C, 26 °C y 53 °C). Se han realizado antes y después de las pruebas de ciclado térmico y de vibración, para comprobar la supervivencia y robustez del módulo fabricado.

B. Pruebas de vibración y vacío térmico

Se han realizado pruebas de vibración en diferentes planos y con diferentes perfiles de frecuencias, entre 20 Hz y 2000 Hz, tanto sinusoidales como aleatorias. Para alguna de las pruebas se ha tenido que preparar un útil especial para la fijación del BEM a la mesa vibratoria.

Las pruebas de ciclado térmico en condiciones de vacío consisten básicamente en ocho ciclos térmicos, durante un tiempo de unas 31 horas, entre -40 °C y $+60$ °C. Se ha comprobado la supervivencia del BEM y su funcionalidad tras las pruebas de vibración y ciclado.

C. Pruebas de compatibilidad electromagnética

La unidad se ha sometido a pruebas de EMC tanto radiadas como conducidas, con señales interferentes desde 30 Hz a 18 GHz (según cada prueba particular).

Las pruebas incluyen emisión y susceptibilidad de campo eléctrico y magnético en el caso de las radiadas, y emisión y susceptibilidad en el caso de conducidas a través de las entradas de las líneas de alimentación (± 5 Volt). En el caso de susceptibilidad conducida se detectaron incumplimientos de las especificaciones a algunas frecuencias, por lo que hubo que añadir filtros adicionales en las entradas de alimentación. Tras el cambio de diseño se repitieron las pruebas resultando satisfactorias.

VI. CONCLUSIONES

Se ha fabricado y medido el Modelo de Calificación del módulo posterior del radiómetro de 30 GHz de la misión Planck. La campaña de calificación ha demostrado que el módulo ha superado con éxito las estrictas pruebas de vibración y ciclado térmico. Esto demuestra la validez de todos los aspectos del diseño eléctrico y mecánico, así como la fiabilidad de la tecnología empleada en su producción.

La unidad ya se ha entregado al consorcio Planck para su integración en el radiómetro completo. El éxito conseguido en el Modelo de Calificación permite continuar con el desarrollo del programa Planck, con la fabricación de todos los equipos de vuelo finales que se integrarán en el satélite.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Plan Nacional de I+D+I, Programa Nacional de Espacio, con las ayudas de referencia ESP2002-04141-C03-01/02/03.

REFERENCIAS

- [1] M. Bersanelli, N. Mandolesi, J. Martí Canales, "Multiband radiometer for measuring the cosmic microwave background", 32nd European Microwave Conference Proceedings, 2002, pp 547-550.
- [2] John D. Kraus, Radio Astronomy, 2nd edition, 1986, Cygnus-Quasar Books.
- [3] B. Aja, J.P. Pascual, L. de la Fuente, J. Gallegos, E. Artal, "A new method to obtain total power receiver equivalent noise temperature", 33rd European Microwave Conference, October 2003, pp 355-358.