

Receptor criogénico en banda Ka para aplicaciones de espacio profundo

A. Mediavilla⁽¹⁾, J.L. Cano⁽¹⁾, D. Vegas⁽¹⁾, E. Artal⁽¹⁾, A. Tazon⁽¹⁾, L. M. de la Fuente⁽¹⁾, C. Chambon⁽²⁾, B. Fauroux⁽²⁾, R. Rayet⁽²⁾, S. Rawson⁽²⁾, S. Halté⁽³⁾

juanluis.cano@unican.es.

⁽¹⁾ Dpto. de Ing. de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Plaza de la Ciencia s/n, 39005, Santander.

⁽²⁾ Callisto France, Villefranche du Lauragais, Francia.

⁽³⁾ ESA-ESOC. Darmstadt. Alemania.

Abstract- This paper describes the design of a ground station antenna feed system, that includes feed horn, polarizer, rejection filter, mono-pulse tracking coupler and low noise amplifiers with polarisation switching. The entire feed system assembly is cooled to cryogenic temperature ($T < 10$ K) in order to maximise the G/T of the ground station antenna. The cryogenic cooling system described is fully redundant and this novel design allows one cryocooler to be removed and replaced, while the other cryocooler is still running. The design has been submitted for patent protection.

I. INTRODUCCIÓN

Las misiones interplanetarias de la Agencia Espacial Europea (ESA) demandan cada vez más el envío de gran cantidad de datos científicos y, para ello, la red de antenas de 35 m de espacio profundo que tiene esta organización requiere de una mejora significativa en la relación G/T con el objetivo de completar el enlace de comunicación con las sondas espaciales remotas.

Aunque las actuales antenas de espacio profundo de la ESA incluyen amplificadores de bajo ruido (LNA) enfriados criogénicamente, el comportamiento en ruido del receptor completo está limitado principalmente por las pérdidas de inserción de los componentes de alimentación de las antenas, los cuales operan a temperatura ambiente. Debido a que es muy complicado reducir las pérdidas de inserción de los elementos pasivos y desarrollar LNAs con una disminución significativa de su temperatura de ruido (T_N), la estrategia más eficiente es enfriar criogénicamente tantos elementos del alimentador de antena como sea posible. Una mejora adicional se consigue por medio de la implementación de un acoplador de seguimiento (tracking) TE₂₁ mono-pulso en la cadena de RF para compensar cualquier error de apuntamiento de la antena, lo cual degrada significativamente la ganancia de antena en banda Ka.

El objetivo general del trabajo descrito en esta contribución es por un lado diseñar un sistema de alimentación criogénico, el cual incluye una antena de bocina, un acoplador de tracking, un polarizador, filtros y amplificadores criogénicos, y por otro lado fabricar y caracterizar un prototipo. En el futuro, este prototipo será mejorado para llegar a ser una unidad operativa. La ESA implementará un sistema de alimentación criogénico en banda Ka en 2020 para dar soporte a las misiones BepiColombo y JUICE con una mejora de la tasa de datos de bajada del 80%.

Esta nueva generación de receptor reemplazará el actual alimentador, que opera a temperatura ambiente, y los tres LNAs criogénicos (dos para operación y otro como recambio). Este receptor incorpora numerosas funcionalidades para satisfacer las restricciones operativas de la ESA. En primer lugar, desde el punto de vista de RF, un adecuado concepto de redundancia basado en un conmutador electromecánico criogénico ha sido implementado de forma que la señal recibida se redirecciona al canal redundante en caso de fallo de un LNA. En segundo lugar, los componentes del alimentador son enfriados hasta unos $T = 9$ K de temperatura física mediante el uso de dos cabezas frías (modo nominal). Si una cabeza fría resulta defectuosa, se ha desarrollado una solución técnica innovadora para poder desconectar y reemplazar dicha cabeza fría mientras que la segunda está aún en funcionamiento. En este caso (llamado modo degradado), la temperatura física en la cadena de RF sube hasta los $T = 11.5$ K. Mediante esta solución se ha conseguido el mejor compromiso que permite mantener el receptor de alto rendimiento operativo a temperatura criogénica en caso de fallo de un elemento principal mientras se evita el tiempo de parada durante la reparación.

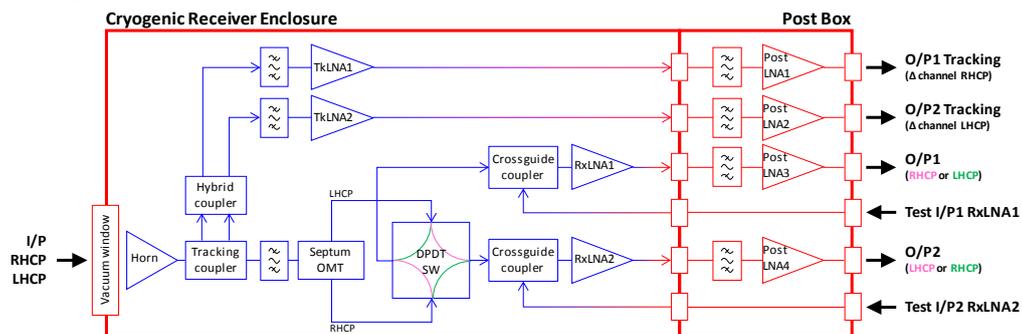


Fig. 1. Diagrama esquemático del alimentador criogénico en banda Ka.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA RECEPTOR

Los requisitos de las antenas de espacio profundo en banda Ka de la ESA son recibir señales en polarización circular en la banda 31.8 – 32.3 GHz mientras mantienen un alto grado de rechazo a 30, 34 y 40 GHz con una relación axial mejor de 0.5 dB en un contorno de 1 dB. Además, la ganancia del sistema alimentador en las entradas de los LNAs tiene que ser mayor de 28 dB quedando la temperatura de ruido hasta ese punto limitada a $T_N = 25$ K.

Para lograr estos objetivos, todos los componentes críticos del sistema criogénico diseñado son instalados en un Dewar dedicado. En la Fig. 1 los elementos en rojo indican operación a temperatura ambiente mientras que los elementos en azul son componentes de RF que funcionan a temperatura criogénica. El interfaz de entrada del Dewar es una ventana que debe aislar el vacío establecido dentro del Dewar y proporcionar un comportamiento tan transparente como sea posible a las frecuencias de banda Ka. Además, esta ventana debería evitar la condensación de agua sobre ella misma y soportar la fuerza ejercida por la diferencia de presión. El diseño se basa en ventanas de presión y vacío hechas con Mylar y otra capa de poliestireno expandido [1] usada para mantener y soportar mecánicamente la ventana de vacío frente al severo estrés que debe soportar. La cadena de RF incluye una bocina, un acoplador de tracking al modo TE_{21} , un filtro en guía circular de bajas pérdidas, un polarizador tipo septum y el conmutador electromecánico criogénico. Varios LNAs criogénicos son incluidos para conseguir un receptor muy sensible. Otros elementos estándar como tramos de guía rectangular, codos o acopladores de inyección son menos relevantes en términos de ruido añadido. Se incluyen además amplificadores y filtros a temperatura ambiente para satisfacer los requerimientos del sistema en relación a la ganancia, rechazo fuera de banda y punto de compresión de salida. La Fig. 2 muestra un dibujo de la sección transversal del Dewar con todos los elementos frontales ensamblados.

A. Antena de bocina

Este elemento representa un gran reto debido a que una bocina corrugada a 32 GHz con 29 dB de ganancia resulta en una longitud de aproximadamente 500 mm y, por tanto, no puede ser incluida en este tipo de receptor. Para superar este problema se diseñó una bocina corrugada con doble perfil (sinusoidal y exponencial), reduciendo la longitud total en un 30% mientras se mantenían los valores de ganancia y diámetro de apertura especificados. La sección de la garganta se diseñó cuidadosamente para garantizar unas pérdidas de retorno del modo TE_{11} mejores de 35 dB, una polarización cruzada mejor de 40 dB y lóbulos laterales por debajo de 36 dB. Además, las pérdidas de retorno de la bocina para el modo TE_{21} están alrededor de los 24 dB.

B. Acoplador de tracking al modo TE_{21}

Los acopladores de tracking al modo TE_{21} de tipo travelling representan una solución elegante y de banda ancha que necesitan, al menos, 200 mm de longitud en banda Ka [2]. Con el objetivo de minimizar de nuevo la longitud total del alimentador, se ha diseñado para esta aplicación un acoplador al modo TE_{21} de tipo resonante con cuatro ranuras en una guía de onda circular sobredimensionada consiguiendo una longitud total de unos 40 mm. Mediante la

concatenación de un acoplador híbrido 90° a las salidas de los puertos del acoplador de tracking, las señales de error RHCP y LHCP pueden ser independientemente extraídas y encaminadas hacia un receptor de tracking convencional. Esta solución compacta proporciona unas pérdidas de retorno de 24 dB en los puertos de tracking mientras se mantienen unos aislamientos mejores de 45 dB entre puertos. Esto asegura un nulo profundo de alrededor de 40 dB en el patrón de radiación delta, lo cual es más que de sobra para las funciones de tracking.

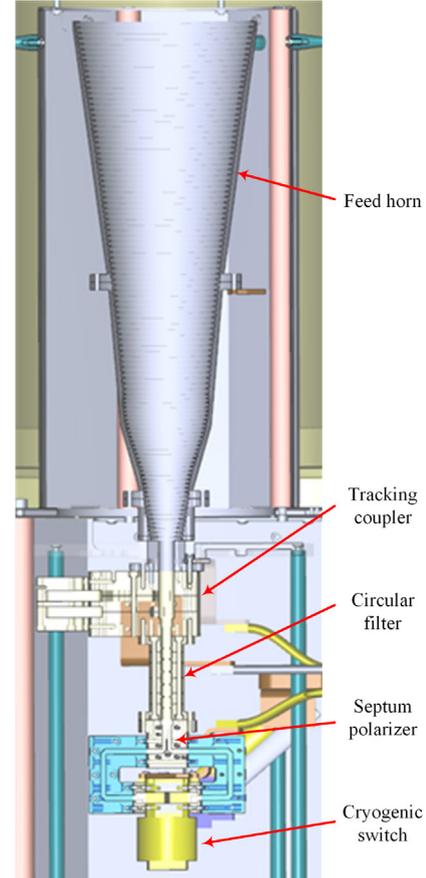


Fig. 2. Dibujo de la sección transversal del receptor desarrollado.

C. Filtro común en guía circular

En la mayoría de los receptores criogénicos existentes el filtraje antes de los LNAs se lleva a cabo en guía rectangular, es decir, hay un filtro por cada canal de recepción. Esto significa una gran cantidad de masa que necesita ser enfriada. La arquitectura que se propone utiliza un solo filtro circular de tipo iris ubicado entre el acoplador de tracking y el polarizador tipo septum. Debido a que el filtro se realizó en aluminio con un posterior recubrimiento de plata, el proceso de diseño tuvo en cuenta el espesor de la capa de plata así como la variación de dimensiones cuando es enfriado. El desplazamiento en frecuencia al enfriar desde temperatura ambiente hasta $T = 15$ K es alrededor de 100 MHz hacia arriba y las pérdidas de inserción disminuyen hasta 0.08 dB.

D. Polarizador tipo septum

Este circuito convencional separa las dos RHCP/LHCP señales entrantes en dos puertos rectangulares separados. Ya que las pérdidas de inserción es un aspecto clave, este componente se diseñó para ser fabricado en dos mitades mediante una técnica especial de mecanizado que sella la

unión, minimizando de esta forma las pérdidas. Las pérdidas de retorno de la entrada y salida son mejores de 30 dB mientras que las pérdidas de inserción medidas permanecen en el rango de los 0.04 dB. Es importante apuntar que este elemento se reoptimizó junto con el acoplador de tracking para asegurar que la relación axial del conjunto permaneciera por debajo de los 0.5 dB.

E. Conmutador electromecánico criogénico

El conmutador criogénico es esencial para proporcionar la función de redundancia en RF. Mediante la actuación de dicho conmutador es posible dirigir la señal RHCP o LHCP hacia uno u otro canal. De esta forma, si hay un fallo en un canal, el otro canal puede recibir señales. Para conseguir esto, un conmutador comercial ha sido específicamente modificado de forma que permite operar fiablemente a temperatura criogénica. Dado que medir las pérdidas de inserción del conmutador a esta temperatura es muy difícil, se ha diseñado un banco de prueba para medir la temperatura de ruido del receptor con y sin el conmutador en la cadena. Entre ambas configuraciones la temperatura de ruido resultó 0.1 – 0.2 K más alta en presencia del conmutador. Las pérdidas de inserción de este componente son extremadamente bajas y se han estimado en 0.01 – 0.02 dB a la temperatura de $T = 25$ K. Es más, este conmutador se ha actuado más de 10.000 veces en criogenia y no se han observado fallos en su funcionamiento. La temperatura de ruido se midió con una muy buena repetitividad antes y después de las pruebas de larga duración, lo cual demostró las altas prestaciones y la fiabilidad del conmutador bajo estas condiciones.

F. Amplificadores de bajo ruido criogénicos

Durante el proyecto se han evaluado dos tipos de amplificadores criogénicos de altas prestaciones. Por una parte se ha comprado un modelo comercial de LNA (referencia LNF-LNC23_43WA) de la empresa Low Noise Factory (LNF, Gotteborg, Suecia), y por otra parte el Centro Astronómico de Yebes (CAY, Yebes, España) ha desarrollado un LNA con la nueva tecnología InAs-HEMT de ETHZ (Zurich, Suiza). La Tabla I recoge los comportamientos de RF medidos en ambos amplificadores.

TABLA I
Resumen de características criogénicas de los LNAs

Parámetros a $T = 15$ K	Valores especificados 31.8-32.3GHz	
	LNC23_43WA	CAY serie YKa
Rango frecuencial	23 - 42GHz	25.5 - 32.3GHz
Temperatura de ruido	7 K max	10 K max
Ganancia	27.5 dB medio	33.5 dB medio
Pérdidas de retorno	10 dB min entrada 14 dB min salida	12 dB min entrada 15 dB min salida
Consumo de potencia	10 mW	18 mW
PoutIdB	-10 dBm típico	-5 dBm típico

III. RESULTADOS DE MEDIDA DEL SISTEMA

Después de completar las fases de diseño preliminar y de detalle, la cadena de RF fue fabricada y medida. Los patrones de radiación con el alimentador de antena y el acoplador de tracking se han verificado para el modo fundamental y el modo de tracking. Como se puede ver en la Fig. 3, la ganancia del modo TE_{11} es 29.2 dB en la dirección de

apuntamiento a 32.05 GHz, asociada con un valor de polarización cruzada de -37 dB en un contorno de 1 dB. Esto conduce a una relación axial de 0.13 dB. Para el modo TE_{21} , la profundidad del nulo está alrededor de 39 dB a 32.05 GHz y la pendiente de tracking está entorno a 0.1 V/V/° hasta $\theta = 4^\circ$ como se muestra en la Fig. 4.

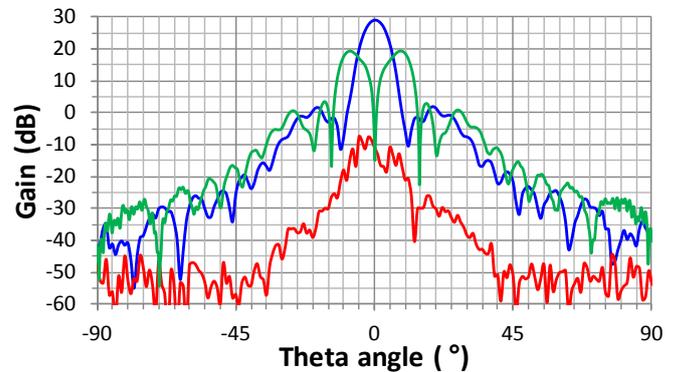


Fig. 3. Patrones de radiación de los modos TE_{11} y TE_{21} medidos a 32.05 GHz para el plano $\phi = 0^\circ$: curva co-polar del modo TE_{11} (azul), componente cruzada del modo TE_{11} (rojo), patrón de radiación del modo TE_{21} (verde).

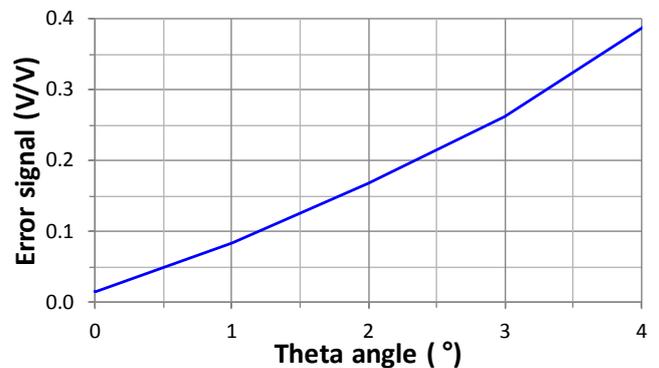


Fig. 4. Señal de error de tracking del modo TE_{21} medida a 32.05 GHz para el plano $\phi = 0^\circ$.

Después de la validación de la cadena de RF, el prototipo de Dewar criogénico en banda Ka se fabricó y midió con éxito en las instalaciones de la empresa Callisto (Francia). En la Fig. 5 se muestra una fotografía del sistema completo. Las dimensiones externas del sistema son de aproximadamente 610 x 1560 mm (incluida la herramienta para la extracción de la cabeza fría) y su peso es de unos 200 kg.



Fig. 5. Vista general del prototipo de Dewar en banda Ka.

Dado que la cadena completa de RF se enfría criogénicamente dentro de un único recipiente, el sistema de enfriamiento se convierte en un punto de fallo crítico. Por tanto, es necesario disponer de sistemas de enfriamiento redundantes funcionando en el sistema. Sin embargo, cuando uno de estos sistemas necesita mantenimiento o tiene un fallo, las cadenas de RF deben permanecer en frío permitiendo así que la temperatura de ruido sea lo bastante baja como para no imposibilitar el funcionamiento operativo de la estación. Para permitir el cambio del sistema de enfriamiento defectuoso mientras el sistema auxiliar sigue en funcionamiento, un sistema propio de camisa (llamado de doble camisa) ha sido diseñado y probado con éxito. Básicamente consiste en una camisa sellada interior con una segunda camisa exterior que encapsula la primera. Esta segunda camisa se une a la cabeza fría y se conecta con una serie de abrazaderas a la primera camisa. Por medio de estas abrazaderas, la camisa interior se puede desacoplar térmicamente de la exterior y la cabeza fría puede ser desmontada sin ningún riesgo mientras que la camisa exterior está aún fría. El sistema de doble camisa se equipa con un sistema hidráulico para poder aplicar una gran fuerza lineal y así extraer esta doble camisa a temperatura criogénica y en alto vacío. La Fig. 6 muestra un perfil de temperatura dentro del receptor en varios puntos mientras una camisa y cabeza fría es extraída y el segundo enfriador se mantiene funcionando. Después de la reconexión del enfriador extraído y su consiguiente enfriamiento, la temperatura nominal recupera su valor esperado ($T = 9$ K).

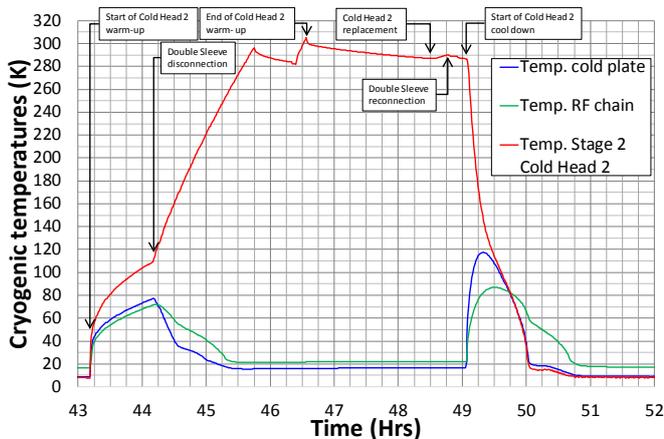


Fig. 6. Extracción de la doble camisa y recuperación de la temperatura bajo operación en criogenia.

La temperatura de ruido se ha medido usando dos cargas adaptadas con valores de ruido muy bien conocidos. La carga caliente es un absorbente a temperatura ambiente puesto en frente de la apertura de la bocina del alimentador, mientras que la carga fría se obtiene cuando dicha bocina apunta hacia el cielo despejado. Para calcular la temperatura del cielo, la temperatura de brillo del cielo se integra dentro de los patrones de radiación de la antena para los modos TE_{11} y TE_{21} [3]. La temperatura de ruido se ha medido para ambos canales RHCP/LHCP y para las dos posiciones de redundancia del conmutador. El valor máximo de estas temperaturas de ruido es aproximadamente $T_N = 17$ K en el rango 31.8 – 32.3 GHz como se muestra en la Fig. 7.

La ganancia y retraso de grupo se han medido mediante el uso de acopladores criogénicos por delante de los LNAs y señales de entrada con un factor de acoplo de alrededor de 31

dB. Para la configuración con los LNAs criogénicos comerciales, la ganancia es de 58.9 ± 0.5 dB y la variación máxima del retraso de grupo es de 0.5 ns en el rango 31.8 – 32.3 GHz y 0.06 ns por cada 20 MHz. El valor de rechazo está dentro de las especificaciones y se encuentra alrededor de 140 dBc a 30 GHz, 120 dBc a 34 GHz y 125 dBc a 40 GHz. Finalmente, el punto de compresión 1 dB de salida es de 12 dBm.

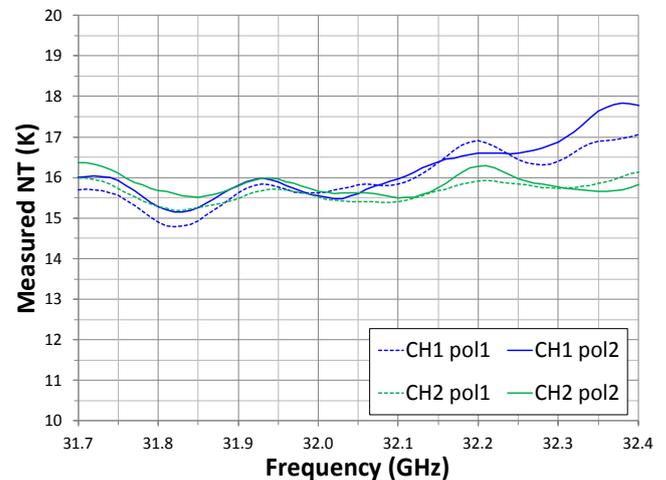


Fig. 7. Medida de la temperatura de ruido del sistema diseñado en banda Ka.

IV. CONCLUSIÓN

Se ha desarrollado un sistema receptor criogénico de altas prestaciones trabajando en banda Ka para aplicaciones de espacio profundo. El receptor propuesto reemplazará los sistemas existentes en las estaciones terrenas que la ESA tiene para comunicaciones con el espacio profundo con un rendimiento superior tanto en RF como en características criogénicas para así obtener mayores tasas de transmisión de datos científicos. Además, el mantenimiento se ha mejorado por medio de la implementación de una solución innovadora que proporciona redundancia en el sistema criogénico. Por medio de esto, el receptor puede seguir operando en frío mientras se realizan operaciones de mantenimiento, lo cual reduce significativamente los cortes durante el funcionamiento.

AGRADECIMIENTOS

Este sistema se ha desarrollado bajo el ESA Technology Research Program y su referencia 4000113406/15/D/JR.

REFERENCIAS

- [1] [1] Y. Lee, B. Ellison, P. Huggard, M. Harman, A. Boughriet, W. Bartynowski, M. Oldfield, N. Morris, P. Hekman and G. Han Tan, "ALMA Front-End Verification Using a Dry Cold Load," 21st International Symposium on Space Terahertz Technology, Oxford, 23-25 March 2010.
- [2] L. Sakr, "The higher order modes in the feeds of the satellite monopulse tracking antennas," *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conf. (MELECON)*, Cairo, Egypt, May 2002.
- [3] T. Y. Otoshi, *Noise Temperature Theory and Applications for Deep Space Communications Antenna Systems*, Artech House, 2008.