

Receptor de polarización a 31 GHz para radioastronomía

Eduardo Artal⁽¹⁾, Beatriz Aja⁽¹⁾, Jaime Cagigas⁽¹⁾, Juan Luis Cano⁽¹⁾, Luisa de la Fuente⁽¹⁾, Angel Mediavilla⁽¹⁾, José Vicente Terán⁽¹⁾, Enrique Villa⁽¹⁾, Roger Hoyland⁽²⁾, Francisco Javier Casas⁽³⁾, David Ortiz⁽³⁾

artale@unican.es, ajab@unican.es, jaime.cagigas@unican.es, juanluis.cano@unican.es, fuenterm@unican.es,
angel.mediavilla@unican.es, teranjv@unican.es, villae@unican.es, rjh@iac.es, casas@ifca.unican.es,
ortizgd@ifca.unican.es

⁽¹⁾ Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Edificio I+D+i Telecomunicaciones. Plaza de la Ciencia s.n. 39005 Santander (Cantabria)

⁽²⁾ Instituto de Astrofísica de Canarias. Calle de la Vía Láctea s.n. 38205 La Laguna (Tenerife)

⁽³⁾ Instituto de Física de Cantabria. Edificio Juan Jordá, Campus de la Universidad de Cantabria, Avenida de los Castros s/n, 39005. Santander (Cantabria)

Abstract- This document describes the scheme and prototype test results of a broadband radioastronomy receiver aimed to obtain polarisation data of Cosmic Microwave Background (CMB) radiation from the sky. Nominal receiver bandwidth is 26 to 36 GHz. The radiometer will work as a polarimeter to obtain the polarisation Stokes parameters (Q, U and I) of the incoming electromagnetic signal to the feed-horns. Prototype tests have demonstrated the receiver concept based on electronic phase switching in two balanced branches. The correlation between signals is performed directly at 31 GHz by a broadband 3 dB/180° hybrid coupler.

en la conmutación de fase (de 90° y de 180°) en cada una de las dos ramas equilibradas del sistema.

Para probar el concepto se ha diseñado y medido un prototipo demostrador, como paso previo a la fabricación de todos los receptores del instrumento, cuyo número será del orden de 30. La correcta obtención de los parámetros de Stokes requiere un buen equilibrio en la respuesta de amplitud y fase de cada rama, siendo esta propiedad un punto crítico del receptor. En la medida del prototipo se ha demostrado que con un componente de ajuste de fase es posible optimizar el funcionamiento de todo el receptor, consiguiendo buenos aislamientos entre la magnitud del parámetro I y los parámetros Q y U.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis de la polarización de la señal del Fondo Cósmico de Microondas (CMB) es una herramienta muy valiosa para mejorar el conocimiento de las leyes físicas del universo. El experimento QUIJOTE [1] es un proyecto coordinado para el diseño, la fabricación y puesta en funcionamiento de varios instrumentos a instalar en radiotelescopios del Observatorio de El Teide en la isla de Tenerife. La polarización de la señal del CMB es baja y se requieren receptores muy sensibles para captar la señal con la calidad suficiente para obtener datos fiables. Los receptores del segundo instrumento de QUIJOTE, que operan en la banda Ka, en el margen de 26 a 36 GHz, son radiómetros de muy bajo ruido, y permiten obtener los valores de los parámetros de Stokes (Q, U, I) que definen la polarización de una onda electromagnética. El esquema del receptor se basa

II. ESQUEMA DEL RECEPTOR

El radiómetro consta de un Módulo Frontal (Front End Module - FEM) enfriado a 20 K, que incluye la antena de bocina (feedhorn), el polarizador y los amplificadores de bajo ruido criogénicos (LNA). El esquema se muestra en la Fig. 1. El polarizador está compuesto a su vez por un desfásador diferencial de 90° en guía de onda cuadrada, seguido de un transductor ortomodo (Ortho Mode Transducer - OMT). A su salida se obtienen las componentes de polarización circular a izquierdas (L) y a derechas (R) de la onda que se ha recibido en la antena de bocina.

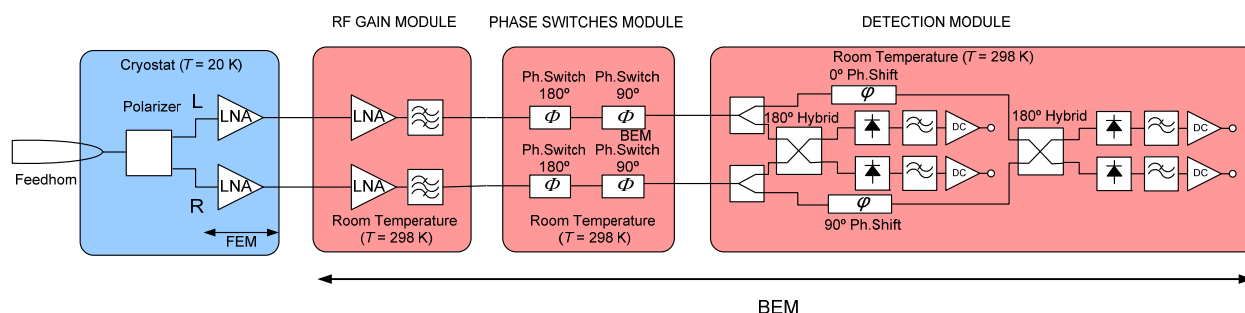


Fig. 1. Esquema del receptor de polarización

A la salida del Módulo Frontal le sigue el Módulo Posterior (Back End Module - BEM) que realiza la función de correlación y detección. Su operación es a temperatura ambiente (298 K). Las señales de cada rama se amplifican (LNA) y se fija la banda de 26 a 36 GHz con filtros paso banda. El siguiente bloque de conmutadores de fase (Phase Switches) contiene desfases conmutables de $0^\circ/90^\circ$ y $0^\circ/180^\circ$, de forma que en cada rama se dispone de cuatro posibles estados de fase (0° , 90° , 180° y 270°).

El último bloque, Módulo de Detección, realiza varias funciones: la correlación entre las señales mediante el uso de dos acopladores híbridos de 180° , la detección con diodos de barrera Schottky y la amplificación en baja frecuencia (DC) con amplificadores operacionales de bajo ruido. Las cuatro salidas del radiómetro son básicamente señales de corriente continua si los conmutadores de fase están en un estado fijo, y son señales de baja frecuencia, del orden de las decenas de kHz, cuando se realiza la conmutación con una señal de dicha frecuencia.

La conmutación permite obtener las diferentes combinaciones de los parámetros de Stokes y a la vez permite cancelar el efecto del ruido de espectro $1/f$ mediante el procesamiento posterior de las señales almacenadas. El módulo de conversión analógico-digital y de procesamiento de las señales que sigue al BEM no está incluido en el esquema de la Fig. 1.

III. PRINCIPIO DE OPERACIÓN. PARÁMETROS DE STOKES.

Todos los receptores estarán situados en el plano focal del radiotelescopio. El alimentador de cada receptor es una bocina corrugada, seguida de un polarizador y un transductor ortomodo [2], de forma que las dos señales a la salida del FEM son proporcionales a las componentes de polarización circular a izquierdas (L) y a derechas (R) de la onda incidente en la bocina.

El principio de operación se puede entender utilizando el esquema simplificado del receptor de la Fig. 2, en el que no se incluyen los amplificadores ni los detectores.

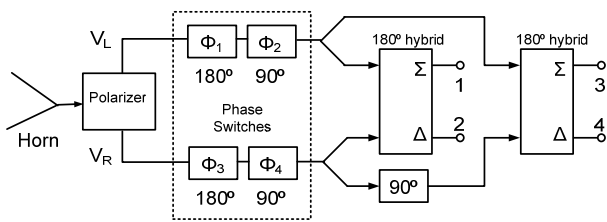


Fig. 2. Esquema simplificado del receptor

La medida de la polarización que se usa habitualmente en astronomía es el conjunto de cuatro parámetros de Stokes [3]. Estos parámetros están relacionados con las amplitudes de las dos componentes ortogonales de campo eléctrico, normales a la dirección de propagación. Si se usan coordenadas circulares (ℓ , r), los cuatro parámetros son los definidos en (1). El parámetro I es una medida de la intensidad total de la onda, es decir de su potencia, los parámetros Q y U miden la polarización lineal, y V mide la polarización circular. Los parámetros de Stokes presentan la ventaja de que experimentalmente se pueden obtener mediante suma o diferencia de potencias medibles en un

receptor. Una forma posible, la utilizada en este receptor, es midiendo las combinaciones de señales a la salida de un polarizador de ondas circulares a izquierdas y a derechas. Los valores en (1) son promedios temporales.

$$\begin{aligned} I &= |E_\ell|^2 + |E_r|^2 \\ Q &= 2 \operatorname{Re}(E_\ell^* E_r) \\ U &= -2 \operatorname{Im}(E_\ell^* E_r) \\ V &= |E_\ell|^2 - |E_r|^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Se sabe que la polarización de la señal del FCM es baja y que no tiene componente de polarización circular ($V = 0$). Una medida de la polarización lineal relativa de la onda es la mostrada en (2).

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (2)$$

En el caso del CMB el porcentaje de polarización es del orden del 7%. Las señales V_L y V_R de entrada a los conmutadores de fase de la Fig. 2, son proporcionales a los campos E_ℓ y E_r de la onda recibida por la antena. Las señales en las salidas 1, 2, 3 y 4, de los dos híbridos de 180° , son detectadas por medio de detectores de respuesta cuadrática, de manera que la tensión detectada de salida es proporcional a la potencia de la señal de microondas. Los parámetros de Stokes (I, Q, U) se obtienen sumando o restando los valores de las señales detectadas. Los conmutadores de fase (de 180° y de 90°) proporcionan diferentes combinaciones para obtener dichos parámetros. Llamando V_{di} (con $i = 1, 2, 3, 4$) a la tensión a la salida de cada detector cuadrático, se obtienen los parámetros de Stokes según se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de Stokes y tensiones detectadas

Φ	I	Q	U
0°	$V_{d1} + V_{d2} = V_{d3} + V_{d4}$	$V_{d1} - V_{d2}$	$V_{d3} - V_{d4}$
90°	$V_{d1} + V_{d2} = V_{d3} + V_{d4}$	$V_{d3} - V_{d4}$	$V_{d2} - V_{d1}$
180°	$V_{d1} + V_{d2} = V_{d3} + V_{d4}$	$V_{d2} - V_{d1}$	$V_{d4} - V_{d3}$
270°	$V_{d1} + V_{d2} = V_{d3} + V_{d4}$	$V_{d4} - V_{d3}$	$V_{d1} - V_{d2}$

Si el receptor no tiene los conmutadores de fase, solamente hay el estado $\Phi = 0^\circ$ y el esquema se reduce al de la Fig. 3.

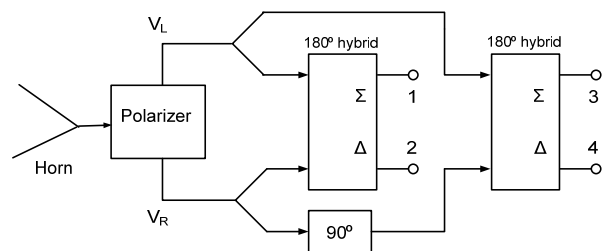


Fig. 3. Esquema del receptor sin conmutadores de fase

En ese caso los parámetros de Stokes se obtienen mediante las combinaciones de las tensiones detectadas indicadas en las ecuaciones (3).

$$\begin{aligned} I &= V_{d1} + V_{d2} = V_{d3} + V_{d4} \\ Q &= V_{d1} - V_{d2} \\ U &= V_{d3} - V_{d4} \end{aligned} \quad (3)$$

IV. MEDIDAS EXPERIMENTALES.

Para la comprobación experimental del esquema del receptor se ha montado en el laboratorio un emulador del sistema, sin incluir el FEM, usando señales de entrada conocidas que correspondan a tipos concretos de polarización de la onda. En el caso de una onda con polarización lineal perfecta, las señales V_L y V_R a la salida del polarizador, y por lo tanto a la salida del FEM, son de la misma amplitud y con un desfase relativo de 90° entre ellas. Estas señales son de banda ancha y tienen un espectro prácticamente igual que el de un ruido blanco filtrado en la banda del receptor (26 a 36 GHz). Para generar dichas señales se ha utilizado el sistema mostrado en la Fig. 4. El ruido blanco filtrado se genera con un amplificador de bajo ruido (LNA) en la banda de interés, que tiene una carga adaptada en guía rectangular en su entrada (Termination WR28). El nivel de potencia se ajusta con un atenuador variable en guía rectangular.

La señal se divide inicialmente en fase con un divisor de potencia (WR28 Power Splitter) de dos salidas. El desfase relativo de 90° entre las dos salidas se realiza con un desfasador de 90° de banda ancha (90° Phase Shifter) construido también en guía rectangular. Tanto el divisor en fase como el desfasador de 90° son componentes específicamente diseñados y construidos para este receptor. Aunque se ha tenido un especial cuidado en utilizar componentes apareados en amplitud y en fase en las dos ramas del sistema, como son los tramos de guía de onda y de cable coaxial y los amplificadores de 45 dB de ganancia del BEM, el ajuste fino de la igualdad de longitud eléctrica de las dos ramas se logra con un componente coaxial de ajuste de fase (Adjusting Phase).

Las cuatro señales de salida de los híbridos de 180° se detectan con detectores a diodo Schottky de respuesta cuadrática y se amplifican con un amplificador diferencial de baja frecuencia, conocido como amplificador de DC o

de video. Los detectores y los amplificadores de DC no se muestran en el esquema de la Fig. 4. En la descripción que sigue se supone que las tensiones de salida (V_{di} con $i = 1, 2, 3, 4$) ya son las detectadas y amplificadas. Dado que las señales a la entrada del BEM, ondas a_i normalizadas, son de la misma amplitud y desfasadas 90° , pueden suponerse del tipo indicado en (4).

$$\begin{aligned} a_1 &= -jA \\ a_2 &= A \end{aligned} \quad (4)$$

Prescindiendo de las constantes de conversión de las señales, desde la entrada del BEM hasta la salida de cada amplificador de DC, ya que afectan por igual a ambas ramas, los valores teóricos de las señales de salida son los indicados en (5).

$$\begin{aligned} V_{d1} &= V_{d2} = A^2/2 \\ V_{d3} &= A^2 \\ V_{d4} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Y según (3) los parámetros de Stokes teóricos son los mostrados a continuación (6):

$$I = U = A^2 ; Q = 0 \quad (6)$$

El ajuste experimental de la fase se ha hecho para minimizar la señal V_{d4} , ya que teóricamente debería ser nula. De la medida se han obtenido los siguientes valores:

$$\begin{aligned} V_{d1} &= 1.75 V \\ V_{d2} &= 1.87 V \\ V_{d3} &= 3.07 V \\ V_{d4} &= 0.92 V \end{aligned} \quad (7)$$

Los parámetros de Stokes medidos, tras normalizar las tensiones para obtener $I = 1$, son los siguientes:

$$\begin{aligned} I &= 1 \quad (0.91 \text{ si se calcula con } V_{d1} + V_{d2}) \\ Q &= -0.03 \\ U &= 0.54 \end{aligned} \quad (8)$$

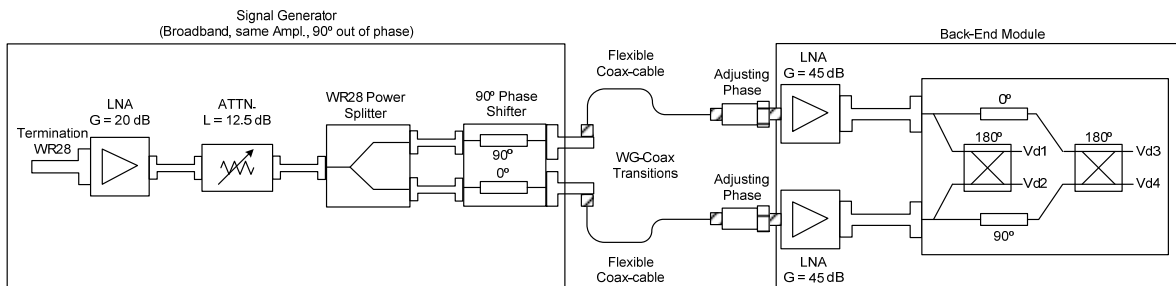


Fig. 4. Esquema del sistema montado en el laboratorio para demostrar el concepto del receptor

Puede definirse como factor de mérito el aislamiento, entre el valor del parámetro de Stokes que debería ser nulo y los parámetros de Stokes que no lo son. Los aislamientos indican las fugas de I hacia Q ó de U hacia Q respecto al caso ideal. En un receptor ideal los aislamientos serían infinitos. En general para un polarímetro se definen los aislamientos siguientes:

$$\text{De I a Q, si idealmente } Q = 0 \\ \text{Isol}_1 = 10 \log |I/Q| \quad (9)$$

$$\text{De I a U, si idealmente } U = 0 \\ \text{Isol}_2 = 10 \log |I/U| \quad (10)$$

Para el caso concreto de los valores medidos y mostrados en (8), se obtienen los siguientes aislamientos:

$$\text{Isol}_1 = 10 \log |I/Q| = 15.2 \text{ dB} \quad (14.8 \text{ dB}) \\ \text{Isol}_2 = 10 \log |U/Q| = 12.5 \text{ dB} \quad (11)$$

La siguiente Fig. 5 muestra una vista general del sistema demostrador montado en el laboratorio.

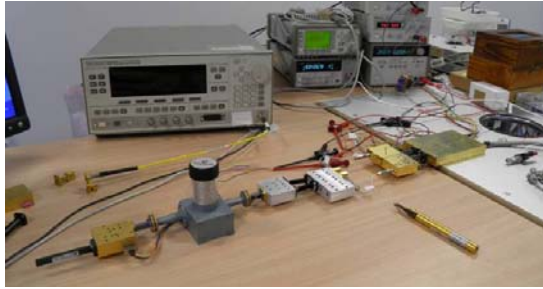


Fig. 5. Sistema demostrador del receptor.

Para comprobar la operación del receptor en la banda de frecuencia de interés (26 a 36 GHz) se han realizado medidas en barrido de frecuencia, con un generador de 22 a 40 GHz. Los resultados obtenidos han sido similares a los de ruido de banda ancha a la entrada. Se ha usado el mismo sistema demostrador, pero sin incluir el LNA a la entrada para evitar la saturación de los detectores. La gráfica de resultados de la Fig. 6, con las tensiones de salida en escala logarítmica, indica como la tensión V_{d3} es aproximadamente el doble que las tensiones V_{d1} y V_{d2} , mientras que la V_{d4} es muy baja, siguiendo los valores teóricos de la ecuación (5).

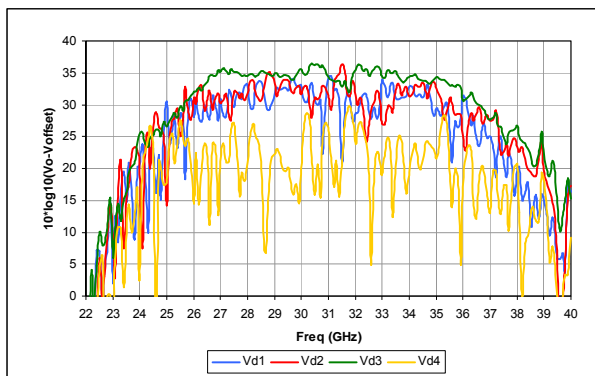


Fig. 6. Tensiones de salida en modo barrido de frecuencia

En la gráfica los valores se han corregido restando la tensión V_{offset} , que es la detectada en ausencia de señal de entrada, debida a la detección del ruido generado por el propio receptor.

V. SIMULACIONES.

Para comprobar la operación del sistema se han realizado simulaciones del demostrador montado en el laboratorio, utilizando ADS (Agilent) con señales de ruido de banda ancha. Cada subsistema se ha caracterizado con sus medidas individuales, conmutadores de fase incluidos. Para el caso de una onda ideal polarizada linealmente ($I = U = 1$; $Q = 0$), y ajustando la fase y la amplitud entre ambas ramas para minimizar el parámetro Q, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 2. Estos resultados concuerdan bien con los obtenidos experimentalmente en el laboratorio, para el caso de $\Phi = 0^\circ$, ya que en el demostrador no se han incluido los conmutadores de fase.

Tabla 2. Resultados de la simulación con ADS del sistema demostrador para una onda linealmente polarizada ideal.

Parameter	$\Phi = 0^\circ$	$\Phi = 90^\circ$	$\Phi = 180^\circ$	$\Phi = 270^\circ$
I	1	1	1	1
Q	0.0283	0.0018	0.0222	0.0112
U	0.956	0.982	0.933	0.941
$10 \log (U/Q)$	15.2 dB	27.4 dB	16.2 dB	19.3 dB
$10 \log (I/Q)$	15.5 dB	27.5 dB	16.6 dB	19.5 dB

De las simulaciones y las medidas realizadas se ha demostrado que es posible ajustar el sistema para conseguir unos buenos aislamientos, mejores siempre que unos 15 dB.

VI. CONCLUSIONES.

Se ha demostrado la correcta operación de un receptor de polarización para la banda de 26-36 GHz, con medidas experimentales validadas con simulaciones.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo está financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, con la ayuda AYA2010-21766-C03-03 y del programa CONSOLIDER-INGENIO 2010 referencia CSD2010-00064.

Los autores agradecen a Ana Pérez y Eva Cuerno por su dedicación y esfuerzo en el montaje de los subsistemas.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Rubiño-Martín et al., "The QUIJOTE CMB experiment" in *Highlights of Spanish Astrophysics V, Astrophysics and Space Science Proceedings*. New York: Springer, 2010, pt. 3, pp. 127–135.
- [2] J. L. Cano, A. Mediavilla, E. Artal, R. Hoyland, "Sistema de Alimentación de Antena en Guía de Onda y Banda-Ka para Aplicaciones de Polarimetría," Comunicación propuesta a URSI-2012.
- [3] A.R. Thompson, J.M. Moran, G.W. Swenson, "Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy", Wiley-VCH, Second edition, 2001.