

Módulos de Conmutación de Fase de 4 Estados en Banda Q para Radioastronomía

Enrique Villa Benito⁽¹⁾, Jaime Cagigas Ibáñez⁽²⁾, Beatriz Aja Abelán⁽¹⁾, Luisa de la Fuente Rodríguez⁽¹⁾, Eduardo Artal Latorre⁽¹⁾.

villae@unican.es, jaime.cagigas@erzia.com, ajab@unican.es, fuenterm@unican.es, artale@unican.es.

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

⁽²⁾ Erzia Technologies. Josefina de la Maza 4, 39012, Santander.

Abstract- Two greater than 30% relative bandwidth phase shifters with four phase states are designed to be integrated in a radio astronomy receiver at Q-band. Two different circuit topologies are presented in order to fulfil requirements. The first circuit is based on planar structures and PIN diodes, while the second design is based on waveguide phase shifters and SPDT MMICs. The planar circuit consists of two 90° out-of-phase microwave phase-shifting branches which are combined by Wilkinson power dividers; each branch is composed of a 180° phase shifter and a band-pass filter. The waveguide solution is based on cascaded 180° and 90° individual phase shifters. Both designs have been manufactured and their experimental characterization have shown significant results, making them suitable for being part of a radio astronomy receiver.

I. INTRODUCCIÓN

Multitud de sistemas de comunicaciones utilizan conmutadores de fase en sus topologías para conseguir la respuesta y rendimiento deseados. Por lo tanto, desde hace tiempo, el diseño de circuitos conmutadores de fase es una tarea importante para la definición de la operación del sistema en el que se quiera implantar, y de manera más particular, cuando se trata sistema de banda ancha.

Dentro de este último caso, podemos encontrar los sistemas dedicados a aplicaciones de radioastronomía, donde se utilizan grandes anchos de banda, que junto al uso de circuitos de muy bajo ruido, hacen que se puedan obtener receptores muy sensibles capaces de medir las señales tan débiles que se esperan en radioastronomía [1].

En el caso de los receptores para radiometría, la necesidad de tener diferentes estados de fase en el receptor viene definida por la necesidad de tener una disminución de los errores sistemáticos propios del sistema, minimizar el ruido $1/f$, y, en el caso concreto del receptor aquí presentado, minimizar el error en la obtención de los parámetros de Stokes. Por lo tanto, la respuesta de los conmutadores de fase

es muy importante para el funcionamiento correcto del sistema, siendo significativo no sólo su respuesta en fase, sino también sus cambios en la amplitud para los diferentes estados que presente [2].

En el caso concreto que se presenta en este trabajo, los diseños de los conmutadores de fase vienen definidos para su operación en los receptores del proyecto EPI ('Exploring the Physics of Inflation') [3], dentro del consorcio QUIJOTE, funcionando en la banda Q (de manera específica, de 35 a 47 GHz). Se trata de un proyecto cuyo objetivo es la caracterización de la polarización del fondo cósmico de microondas (CMB, de las siglas en inglés). El esquema para este receptor es el que se presenta en la Fig. 1, donde se define un módulo específico que contiene los circuitos conmutadores de fase. Este módulo proporcionará 4 estados de fase (0°, 90°, 180° y 270°) que modificará el estado de fase del receptor.

En las siguientes secciones se presentan dos diseños desarrollados para cubrir la banda del receptor, basándose en dos topologías diferentes, ambas integradas en un chasis de guía de onda. La primera mediante tecnología microstrip y diodos PIN como elemento de conmutación, mientras que la segunda opción a través de desarrollos en guía de onda y conmutadores tipo SPDT MMIC.

II. CONMUTADORES DE FASE

Se pueden encontrar numerosas referencias de diseños en banda Q de conmutadores de fase, muchos de ellos desarrollados de forma íntegra en tecnología monolítica [4]-[8], mostrando buenas prestaciones de fase en su banda de operación.

En este trabajo se presentan dos diseños diferentes de conmutadores de fase: uno desarrollado con tecnología planar microstrip y diodos PIN; el segundo desarrollado con desfases en guía de onda y un conmutadores SPDT.

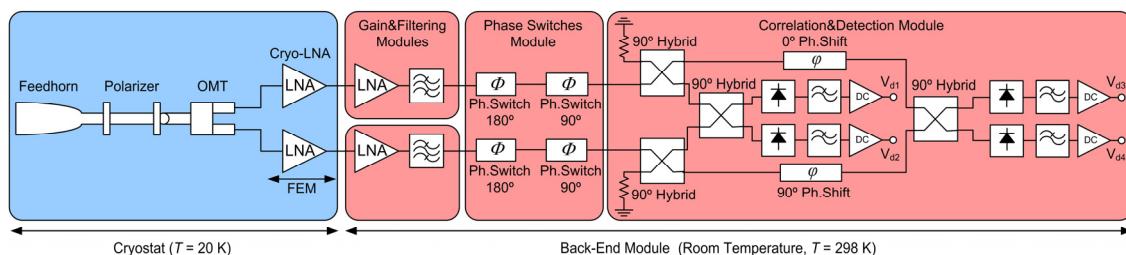


Fig. 1. Esquema del receptor para el proyecto EPI.

A. Conmutador de fase de 4 estados en tecnología planar

El circuito conmutador de fase en tecnología planar está basado en el circuito que se muestra en la Fig. 2 [9]. Se trata de un circuito con dos ramas que presentan una diferencia de fase fija entre ellas de 90° y que, a su vez, cada una de ellas puede cambiar su fase 180° . Las dos ramas son conectadas entre ellas a través de un divisor tipo Wilkinson, utilizado en la entrada del circuito como divisor y a la salida como combinador.

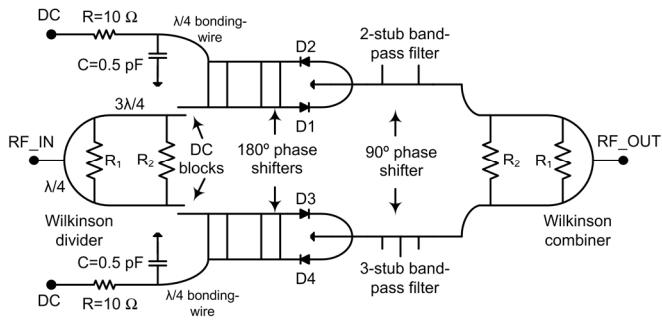


Fig. 2. Esquema del circuito en tecnología planar.

El cambio de fase fijo de 90° entre ramas se consigue con el uso de dos filtros paso banda, que difieren entre sí dicho valor en su señal transmitida. El cambio de fase de 180° en cada rama se lleva a cabo a través de un conmutador de fase basado en el diseño desarrollado en [10]. Utiliza 2 diodos PIN, modelo HPND-4005 de Avago Technologies, para efectuar el cambio de fase. En total 4 diodos en el circuito completo.

El diseño está realizado en sustrato de alúmina, y a través de la capa resistiva de 50 Ohm/cuadro que presenta, se realiza el grabado de las resistencias del circuito divisor/combinador tipo Wilkinson directamente sobre el sustrato, sin necesidad de realizar el montaje posterior de las resistencias.

En la Fig. 3 se puede ver una fotografía del prototipo fabricado para la caracterización experimental en la estación de sondas coplanares, antes de su integración en el módulo en guía de onda WR-22. Para su integración en el módulo con accesos en guía se han diseñado transiciones de línea microstrip a guía de onda WR22 para su montaje en los accesos del circuito planar.

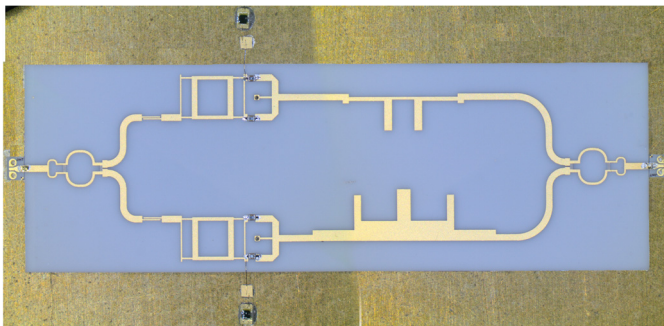


Fig. 3. Fotografía del circuito microstrip.

B. Conmutador de fase de 4 estados en guía de onda

En el caso del conmutador de fase de 4 estados diseñado en guía de onda WR22, se toma como referencia el trabajo desarrollado en [11], donde se ha realizado desfases fijos

de 90° y 180° utilizando guías de onda con cambios en la anchura de la guía ('ridged waveguide').

La propuesta aquí mostrada es realizar una guía de onda escalonada de manera progresiva, es decir, sin los saltos abruptos de una tipo 'stepped ridge' clásica, haciendo una modificación progresiva de la anchura del canal de la guía de onda a través de un perfil tipo sinusoidal.

El diseño del desfase diferencial de 180° sigue la misma línea desarrollada para el caso del desfase diferencial de 90° [12]. Estos diseños se basan en la realización de una pestaña en vez del mecanizado directo de escalones en la guía. Esta pestaña seguirá un perfil sinusoidal que permite conseguir la diferencia de fase deseada respecto a un tramo de guía de onda recto. La realización de estas pestañas en sustitución de los saltos de anchura sobre la mecánica facilita el mecanizado de los componentes y, por lo tanto, reduce costes de fabricación.

Ambos diseños se han integrado en un único chasis de aluminio en el que se ha añadido la conmutación entre ambas ramas para el cambio de fase, siguiendo el esquema de la Fig. 4. Esta función se ha implementado a través del uso del SPDT MMIC MA4AGSW2 de MACOM Technology Solutions. Cada desfase utiliza 2 SPDTs, con lo que en el montaje final de la caja se incluirán 4 unidades.

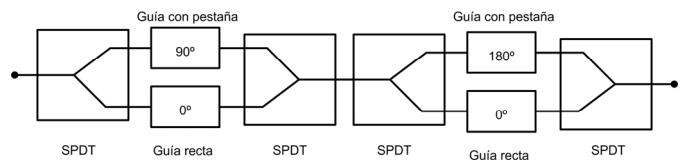


Fig. 4. Esquema del circuito con diseños en guía de onda.

En la Fig. 5 se representan, respectivamente, vistas artísticas de los desfases individual de 90° y de 180° , mientras que en la Fig. 6 se muestra una vista de la integración dentro de un módulo conjunto con ambos desfases y la conmutación integrada a través de los SPDTs. Se puede ver que para el montaje final de un módulo con estos desfases, se han diseñado transiciones de línea coplanar a guía de onda WR22 para el interconexión de los SPDTs, que permiten también la polarización de los conmutadores de manera correcta.

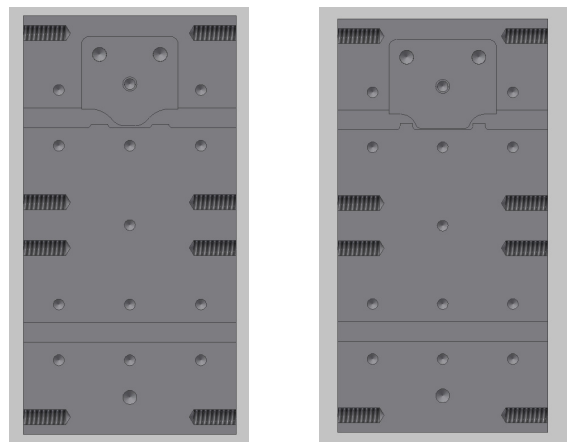


Fig. 5. Vistas artísticas de los desfases diferenciales. Desfase diferencial de 90° a la izquierda y de 180° a la derecha.

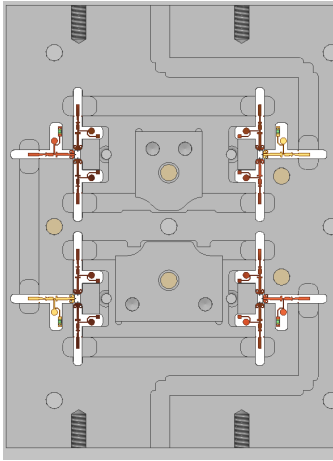


Fig. 6. Vista artística del diseño integrado en guía de onda.

III. CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

Se ha realizado el mecanizado, la fabricación de los circuitos y el montaje de una unidad de cada una de las alternativas, con el objeto de comprobar su respuesta tanto en fase como en amplitud en los diferentes cambios de fase en el rango de frecuencias requerido.

A los módulos se les ha añadido funcionalidad completa para la conmutación a través del uso del driver DR65-0109 de MACOM Technology Solutions, que permite, a través de la introducción de señales TTL para el control de los estados, generar las distintas señales de onda cuadrada a su salida con las amplitudes adecuadas.

La caracterización se ha realizado con un analizador de redes PNA E8364A en la banda de 30 a 50 GHz, utilizando un kit de calibración comercial de banda Q.

Ambas unidades han sido montadas, y en las siguientes imágenes se puede ver una fotografía de cada módulo. Se observa en la Fig. 7 el montaje del circuito en tecnología planar junto con las transiciones a guía de onda. De la misma manera, en la Fig. 8 se muestra una fotografía del diseño con desfases en guía de onda, con las transiciones a los conmutadores SPDT y las pestañas desfasadoras.

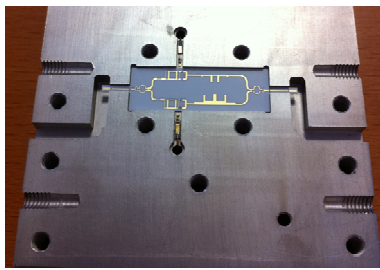


Fig. 7. Fotografía del módulo conmutador de fase con tecnología planar.

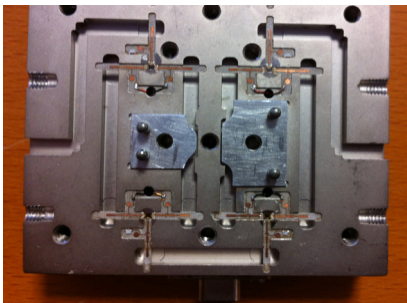


Fig. 8. Fotografía del módulo conmutador de fase con tecnología en guía de onda.

A continuación se presentan los resultados de la medida para ambos módulos. Se muestran en las Fig. 9 y Fig. 10, las adaptaciones en ambos accesos en guía de onda y las pérdidas de inserción, todo ello para el estado de referencia de cada módulo.

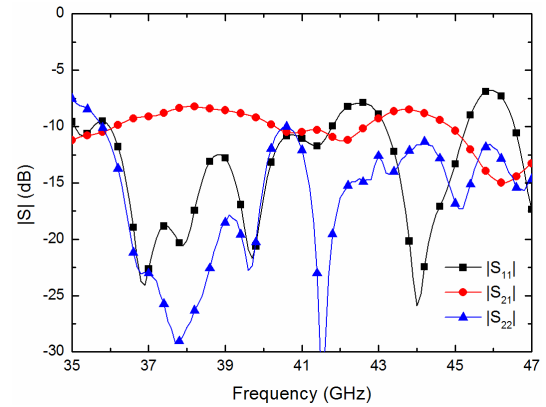


Fig. 9. Parámetros de Scattering del estado de referencia para el circuito microstrip.

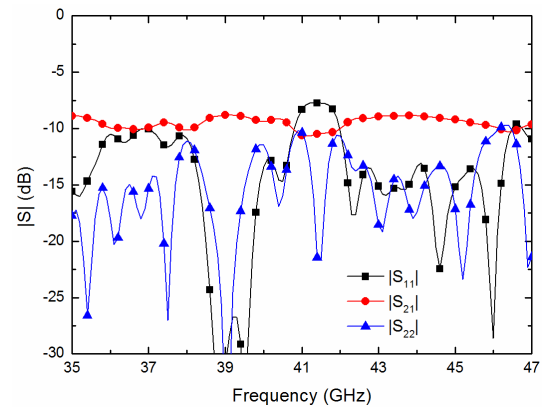


Fig. 10. Parámetros de Scattering del estado de referencia para los circuitos en guía de onda.

En las Fig. 11 y Fig. 12, se pueden ver las 3 diferencias de fase obtenidas en cada módulo respecto al estado referencia. Para el caso del circuito en tecnología microstrip se obtienen como valores medios de las diferencias de fase en la banda de 35 a 47 GHz 88.4°, 172.5° y -93.1°. En el caso de los desfases en guía de onda se miden 85.7°, 176.9° y -97.3°. En las Fig. 13 y Fig. 14, se pueden ver los errores cuadráticos medios de ambos módulos en la banda de trabajo del receptor, observando que el error en amplitud se mantiene en ambos casos por debajo de 1.6 dB, mientras que en fase tienen valores similares ambos desarrollos.

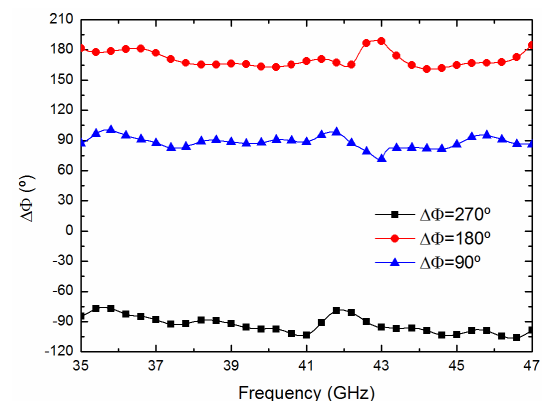


Fig. 11. Diferencias de fase en el circuito microstrip.

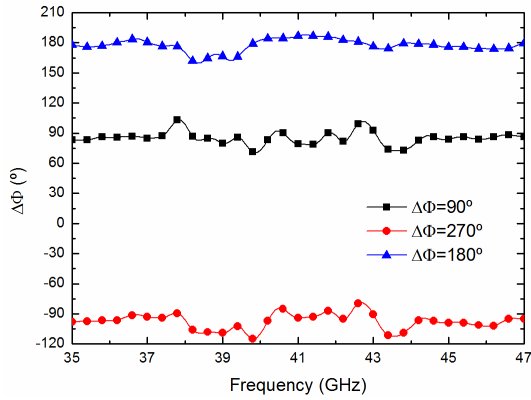


Fig. 12. Diferencias de fase en los circuitos guía de onda.

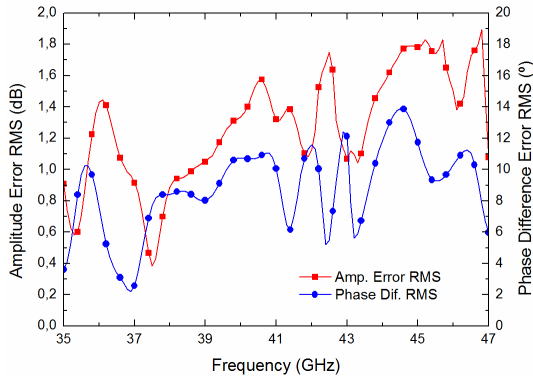


Fig. 13. Errores RMS de fase y amplitud en el circuito microstrip.

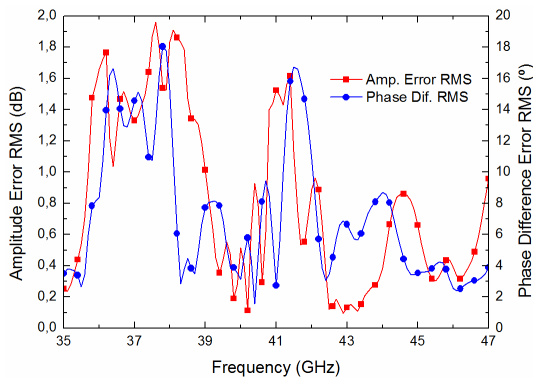


Fig. 14. Errores RMS de fase y amplitud en los circuitos guía de onda.

Si se comparan los resultados que proporcionan ambos módulos, se observa que los dos cubren la banda de operación del receptor. En cuanto a la respuesta en fase, ambas propuestas proporcionan resultados válidos, teniendo un error pequeño en el desequilibrio de amplitud entre estados. La ventaja que proporciona la solución en tecnología microstrip integrada en guía de onda es la mayor sencillez del mecanizado, ya que la fabricación de las pestañas con perfil sinusoidal es costoso. Además, un factor crítico en la solución en guías de onda es el correcto posicionamiento y ajuste de las pestañas en el cierre de la caja, ya que si su colocación no es correcta, la respuesta en fase que proporciona deja de ser precisa. Ante la similitud en las respuestas obtenidas, y debido a la mayor sencillez de fabricación y montaje, se ha elegido la opción desarrollada en tecnología microstrip para la realización de la primera cadena completa del receptor.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado dos módulos conmutadores de fase de 4 estados trabajando en banda Q con el objeto de ser parte de un receptor para radioastronomía en el rango de frecuencias de 35 a 47 GHz. Se ha presentado un circuito en tecnología microstrip integrado en un chasis en guía de onda que utilizó diodos PIN para realizar la conmutación. Se ha descrito un diseño en tecnología de guía de onda a través de desfases basados en guía escalonada con perfil sinusoidal que utiliza un conmutador SPDT para realizar los cambios de estado. Se ha demostrado el correcto funcionamiento en la banda de interés de ambos diseños, posibilitando su integración en el receptor.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad bajo el programa CONSOLIDER-INGENIO 2010 referencia CSD2010-00064. Los autores agradecen a Eva Cuerno por la fabricación y el montaje de los circuitos.

REFERENCIAS

- [1] E. Villa, J. L. Cano, J. Cagigas, D. Ortiz, F. J. Casas, A. R. Pérez, B. Aja, J. V. Terán, L. de la Fuente, E. Artal, R. Hoyland, and A. Mediavilla, "The thirty gigahertz instrument receiver for the Q-U-I Joint Tenerife experiment: Concept and experimental results," *Rev. Sci. Instruments*, vol. 86, 024702, pp. 1–9, Feb. 2015.
- [2] F. J. Casas, D. Ortiz, E. Villa, J. L. Cano, J. Cagigas, A. R. Pérez, B. Aja, J. V. Terán, L. de la Fuente, E. Artal, R. Hoyland, and R. Génova-Santos, "The Thirty Gigahertz Instrument Receiver for the QUIJOTE Experiment: Preliminary Polarization Measurements and Systematic-Error Analysis," *Sensors*, vol. 15, no. 8, pp. 19124–19139, Aug. 2015.
- [3] Proyecto EPI, www.epi-consolider.es
- [4] M. Kim, J. G. Yang, and K. Yang, "Switched transmission-line type Q-band 4-bit MMIC phase shifter using InGaAs pin diodes," *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 3, pp. 225–226, Feb. 2010.
- [5] K. W. Koh, and G. M. Rebeiz, "A Q-band Four-Element Phased-Array Front-End Receiver with Integrated Wilkinson Power Combiners in 0.18- μm SiGe BiCMOS Technology," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 56, no. 9, pp. 2046–2053, Sep. 2008.
- [6] K. W. Koh, J. W. May, and G. M. Rebeiz, "A Millimeter-Wave (40–45 GHz) 16-Element Phased-Array Transmitter in 0.18- μm SiGe BiCMOS Technology," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 5, pp. 1498–1509, May 2009.
- [7] J. H. Kim, and J. W. Lee, "A Q-band 4-bit phase shifter using 0.13 μm CMOS technology," *Microw. Opt. Tech. Lett.*, vol. 55, no. 11, pp. 2676–2680, Nov. 2013.
- [8] C. Y. Kim, D. W. Kang, and G. M. Rebeiz, "A 44–46-GHz 16-Element SiGe BiCMOS High-Linearity Transmit/Receive Phased Array," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 3, pp. 730–742, Mar. 2012.
- [9] E. Villa, J. Cagigas, B. Aja, L. de la Fuente, E. Artal, "Conmutador de fase de 4 estados en la banda de frecuencias de 35 a 47 GHz," in *XXX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, Pamplona, Spain, 2015.
- [10] R. J. Hoyland, "A new MMIC wideband 180° phase switch design for millimeter wave applications," in *Proceedings 3rd ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications*, Espoo, Finland, 2003, pp. 305–310.
- [11] A. Tribak, A. Mediavilla, J. Zbitou, J. L. Cano, "Novel Ridged Waveguide Differential Phase Shifter for Satellite Application," *Int. Journal of Microw. Opt. tech.*, vol. 9, no. 6, pp. 409–414, Nov. 2014.
- [12] J. Cagigas, J. L. Cano, E. Artal, "Desfasador Diferencial 90° Compacto de Banda Ancha en Guía de Onda," in *XXVIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, Santiago de Compostela, Spain, 2013.