

Discriminador de frecuencia basado en resonadores “dual-mode” sintonizables

A. Moscoso-Mártir⁽¹⁾, I. Molina-Fernández⁽¹⁾, Jiasheng Hong⁽²⁾

amm@ic.uma.es, imf@ic.uma.es, J.Hong@hw.ac.uk

⁽¹⁾ Dpto. Ingeniería de Comunicaciones E.T.S.I. Telecomunicación Universidad de Málaga, España

⁽²⁾ Dept. of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland

Abstract- In this paper a novel varactor-tuned frequency discriminator that makes use of two tunable dual-mode microstrip resonators is demonstrated. In this circuit, the two tuned modes of the resonators are used independently to cover different frequency ranges, potentially doubling the tuning frequency range of the classic approach. To prove its validity a prototype of the tunable dual-mode microstrip resonator is manufactured and the measured results are used to study the frequency discriminator response. This new approach can cover almost an octave of frequency range from 1.05 to 2 GHz with a sensitivity of 45 V/GHz and 21 V/GHz for the first and second mode, respectively.

I. INTRODUCCIÓN

El discriminador de frecuencias es un importante subsistema de microondas usado en muchas aplicaciones tales como: i) sistemas electrónicos inteligentes y radares para la localización señales desconocidas [1], ii) caracterización y medida del ruido de fase en osciladores locales [2], y iii) reducción del ruido de fase de osciladores controlados por tensión (VCO) trabajando dentro de bucles enganchados en frecuencia (FLL) [3].

Aunque existen diferentes arquitecturas que pueden realizar medidas instantáneas de frecuencia, el discriminador de frecuencia basado en línea de retardo [4] ha sido la opción más desarrollada en los últimos años [1,2,5,6]. El principal problema de este subsistema es que necesita líneas de retardo de gran longitud para obtener una sensibilidad en frecuencia adecuada, lo que dificulta su integración, debido a que estas líneas son muy voluminosas.

Una alternativa muy interesante para reducir el tamaño y la complejidad del subsistema es el discriminador balanceado basado en circuitos resonantes [7]. Este circuito hace uso de las transiciones entre las bandas de paso y rechazo de sus dos circuitos resonantes para obtener una señal en tensión a la salida linealmente dependiente con la frecuencia instantánea de la señal de entrada. Los principales inconvenientes de esta solución en tecnologías planares son el limitado rango de frecuencias que cubre y su baja sensibilidad, debido al rango de ajuste y factor de calidad de los varactores disponibles actualmente [5,8].

Para superar las principales limitaciones del discriminador balanceado, en este trabajo se propone un nuevo esquema basado en la utilización de dos resonadores “dual-mode” ajustables en frecuencia (ver Fig. 1). Los resonadores “dual-mode” son circuitos que han atraído mucha atención en los últimos años en el ámbito del diseño de filtros [8,9]. La principal ventaja de estos circuitos es que soportan dos modos (el par y el impar) que introducen dos

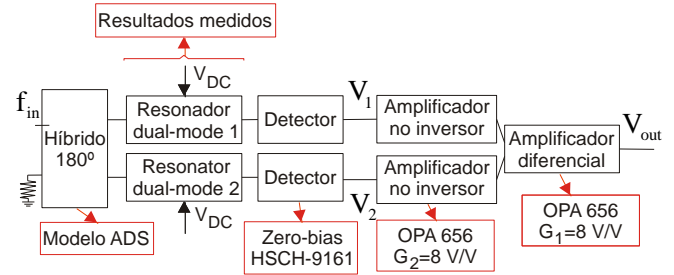


Fig. 1. Diagrama de bloques del discriminador de frecuencias basado en resonadores “dual-mode” ajustables en frecuencia. Las cajas rojas dan información sobre cada uno de los elementos usados en la simulación final realizada en la sección IV.

polos distintos, lo que permite reducir a la mitad el número de resonadores necesarios. Sin embargo, en este trabajo los modos par e impar de estos resonadores se usan de forma independiente para cubrir dos rangos de frecuencia diferente. Esto permite doblar el rango de frecuencias que la solución clásica es capaz de cubrir y hace posible el diseño de discriminadores de frecuencia compactos y de gran ancho de banda.

Para demostrar la validez de este nuevo discriminador de frecuencia se ha diseñado y fabricado el prototipo de un resonador microstrip “dual-mode”. Con los resultados obtenidos se ha realizado un estudio de las prestaciones del discriminador de frecuencias completo. Dicho estudio muestra que el discriminador propuesto basado en resonadores “dual-mode” ajustables en frecuencia es capaz de cubrir el rango de frecuencias de 1.05 a 2 GHz con una buena sensibilidad mejor de 45 V/GHz y 21 V/GHz para el primer y segundo modo respectivamente.

II. DISCRIMINADOR DE FRECUENCIAS “DUAL-MODE”

El diagrama de bloques del nuevo discriminador propuesto se muestra en la Fig. 1. Esta arquitectura hace uso de un híbrido de 180° (en lugar del transformador de la estructura clásica [7]) para separar señal de entrada entre los dos resonadores “dual-mode”. Tras ser filtradas, la potencia de las señales de salida de los resonadores son medidas por dos detectores de potencia, obteniendo a la salida dos señales de continua (V_1, V_2) que dependen de la frecuencia y de la potencia de la señal de entrada, y cuya respuesta se muestra en la Fig. 2(a). Finalmente, estas señales de continua (V_1, V_2) son amplificadas y restadas, obteniendo la respuesta en frecuencia mostrada en la Fig. 2(b). Esta respuesta en frecuencia presenta dos transiciones que cruzan por cero a las frecuencias f_{01} y f_{02} . En torno a dichas frecuencias (f_{01}, f_{02})

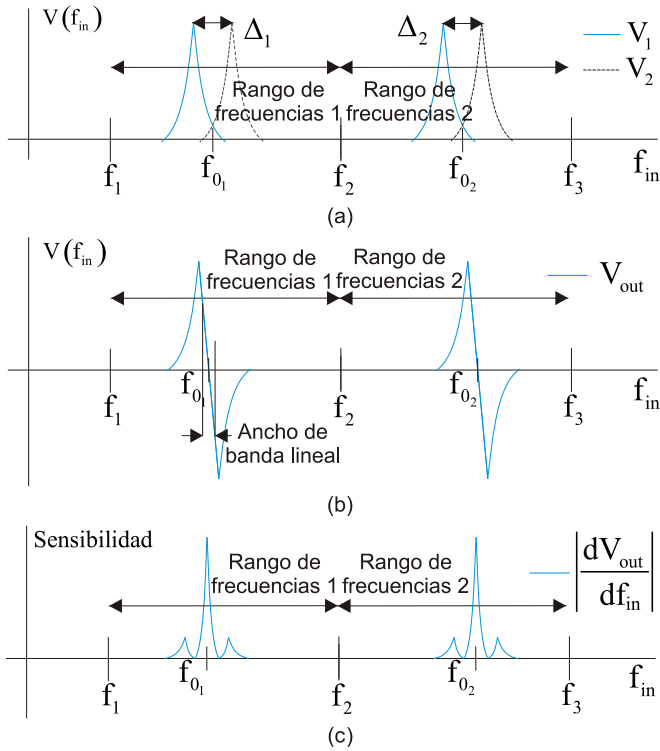


Fig. 2. Principio de operación del discriminador de frecuencia basado en resonadores “dual-mode” ajustables en frecuencia. a) Respuesta en frecuencia a la salida de los detectores de potencia. b) Respuesta en frecuencia a la salida del amplificador diferencial. c) Sensibilidad.

existe una dependencia lineal entre la frecuencia de la señal de entrada y la tensión detectada ($V_{out}(f_{in})$), por lo que el circuito se comporta como un discriminador de frecuencias lineal. Dicha dependencia lineal consigue su máxima pendiente en un pequeño rango de frecuencias en torno a f_{01} y f_{02} , obteniéndose la máxima sensibilidad en torno a dichas frecuencias, como se muestra en la Fig. 2(c). Dado que estos rangos de frecuencias en los que se consigue la dependencia lineal son muy pequeños en comparación con las frecuencias f_{01} y f_{02} , en la Fig. 2(c) se muestran de forma puntual como máximos en la sensibilidad. La principal novedad de esta propuesta radica en que para cada tensión de control (V_{DC}), el discriminador basado en resonadores “dual-mode” puede trabajar en dos bandas de frecuencias distintas próximas a f_{01} y f_{02} . Además, los resonadores se pueden diseñar haciendo uso de dos señales de control diferentes para controlar el ajuste del segundo rango de frecuencias de forma independiente. Esto permite doblar el rango de frecuencias de la solución clásica sin incrementar en gran medida su complejidad.

La precisión de este nuevo discriminador depende de la sensibilidad normalizada del mismo en torno a las frecuencias f_{01} y f_{02} (ver Fig. 2(c)), definida como

$$\text{Sensibilidad} = \frac{1}{G_1 G_2} \frac{dV_{out}(f_{in})}{df_{in}}, \quad (1)$$

donde G_1 y G_2 son las ganancias de los amplificadores usados a la salida de los detectores.

Esta sensibilidad depende fundamentalmente del factor de calidad Q de los resonadores diseñados y de la diferencia relativa entre sus frecuencias resonantes (Δ_i). Ambos resonadores deben tener sus frecuencias resonantes ligeramente separadas en todo el rango de frecuencias para detectar cualquier frecuencia dentro de su ancho de banda de

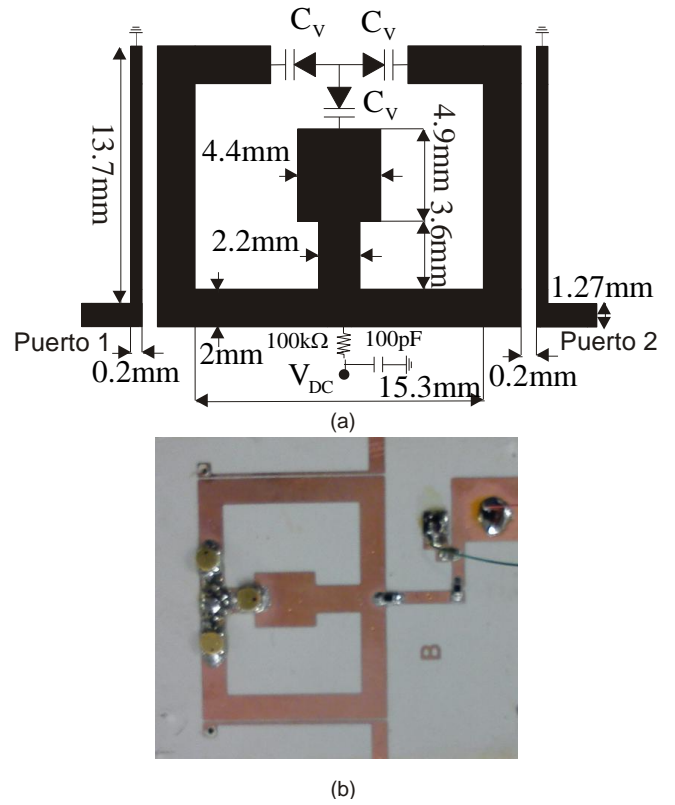


Fig. 3. a) Layout del resonador “dual-mode” propuesto, diseñado usando el sustrato RO3003 con un espesor de 0.5 mm y un permitividad relativa de 3. b) Fotografía del prototipo fabricado (26x25mm²).

operación (ver Fig. 2(a)). Hay dos opciones para ajustar la diferencia relativa de dichas frecuencias resonantes (Δ_i), i) diseñar dos resonadores diferentes que se puedan controlar con la misma tensión de control (V_{DC}) en cada una de las ramas del discriminador (como en la Fig. 1), o ii) diseñar un único resonador pero controlarlo con una tensión de alimentación distinta en cada rama del discriminador. En este trabajo se ha optado por la segunda opción para estudiar las prestaciones del discriminador propuesto.

III. DISEÑO DEL RESONADOR “DUAL-MODE” AJUSTABLE MEDIANTE VARACTOR

Los resonadores “dual-mode” ajustables en frecuencia son la clave del nuevo discriminador de frecuencias. Estos determinan el máximo rango de frecuencias que el discriminador puede cubrir y su sensibilidad. Es importante diseñar estos circuitos con un factor de calidad aceptable para incrementar la pendiente de la respuesta en frecuencia en torno a las frecuencias de resonancia y ajustar la diferencia relativa entre ambas (Δ_i) para maximizar la sensibilidad del discriminador.

La Fig. 3(a) muestra el layout del resonador microstrip “dual-mode” ajustable diseñado, similar al estudiado en [9], pero adaptado a esta nueva aplicación. Este circuito usa tres varactores MA46H203 [10] y una red de alimentación para controlar los modos par e impar de la estructura. En este caso cada modo se usa de forma independiente para cubrir dos rangos de frecuencias distintos, lo que hace el procedimiento de diseño muy simple: i) primero, la línea de transmisión externa conectada a dos de los varactores en sus extremos se diseña para controlar el primer modo (modo par), después,

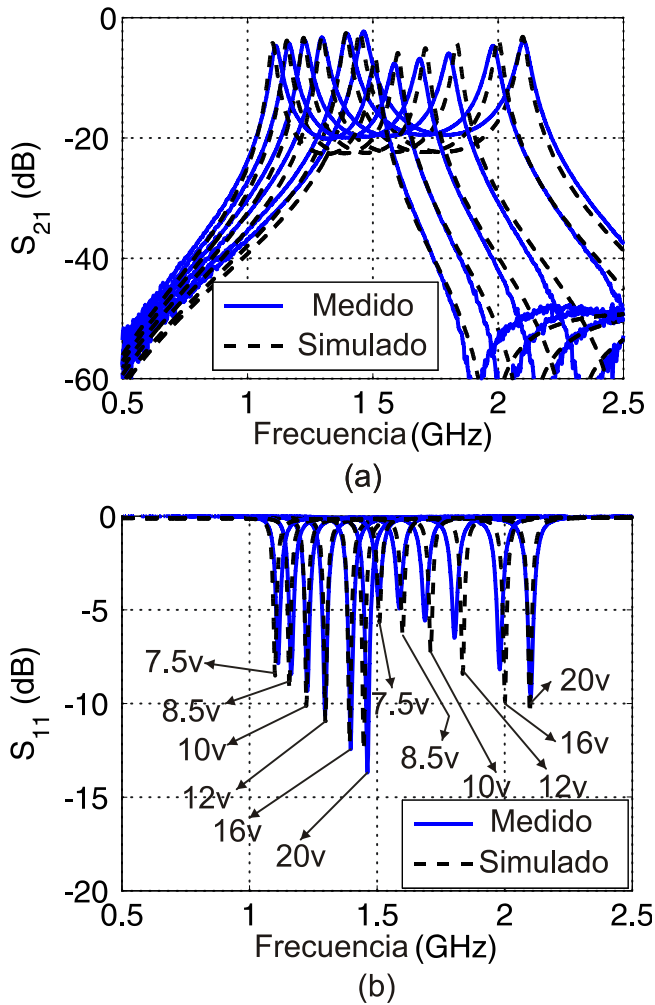


Fig. 4. Simulación y medida de los parámetros S del resonador “dual-mode” diseñado para tensiones entre 7.5 y 20 V. a) Pérdidas de inserción (S_{21}). b) Pérdidas de retorno (S_{11}).

ii) el “stub” central conectado al tercer varactor se diseña para ajustar las prestaciones del segundo modo (modo impar) sin afectar al modo par, y finalmente, iii) las líneas acopladas externas usadas para acceder a la estructura se diseñan como transformadores de banda ancha, para desacoplar el resonador de las líneas de acceso y mejorar su factor de calidad. Las dimensiones finales del circuito se incluyen en la Fig. 3(a).

Este circuito se ha fabricado usando el sustrato Roger 3003 (con un espesor de 0.5 mm y permitividad relativa de 3). El tamaño total de este circuito ha sido menor de 26x25 mm² y su fotografía se muestra en la Fig. 3(b). Este circuito se ha medido para diferentes tensiones de control en el rango de 6 a 20V y algunos de los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 4. Esta figura muestra una buena concordancia entre los resultados medidos y simulados, con las frecuencias de resonancia de los modos par e impar cubriendo el rango de frecuencias entre 1.1 y 2.1 GHz. Las mayores diferencias entre los resultados medidos y simulados aparecen en la banda de rechazo situada entre las dos frecuencias de resonancia del circuito. Dicho rechazo ha sido menor del esperado debido a problemas en la definición de las pistas externas de acceso al resonador.

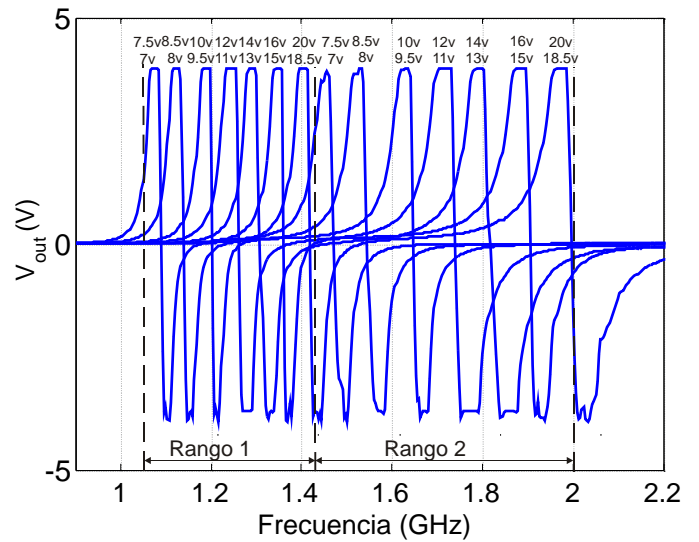


Fig. 5. Salida en tensión del discriminador de frecuencias “dual-mode” para diferentes niveles de la tensión de control entre 7 y 20 V.

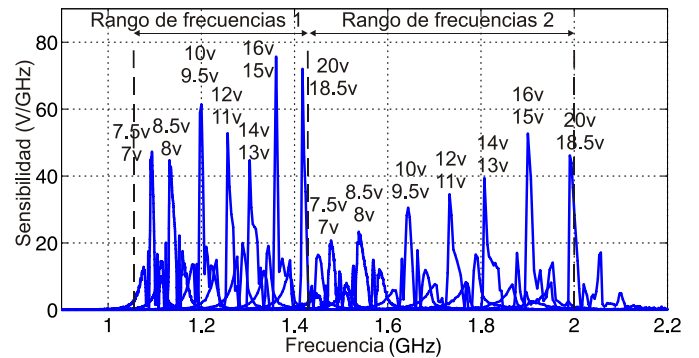


Fig. 6. Sensibilidad simulada del discriminador de frecuencias propuesto para diferentes niveles de la tensión de control entre 7 y 20 V.

IV. DISCRIMINADOR DE FRECUENCIA

El discriminador de frecuencias propuesto ha sido diseñado usando el diagrama de bloques mostrado en la Fig. 1 y los resultados obtenidos en la medida del resonador “dual-mode” fabricado para diferentes valores de la tensión de control. El resto de elementos usados en este estudio son: i) un híbrido de 180°, ii) dos detectores de potencia HSCH-9161 de Avago [11], y iii) tres amplificadores operacionales OPA656 de Texas Instrument con una ganancia de 8V/V [12].

La salida en tensión del discriminador de frecuencia para diferentes pares de tensión de control se muestra en la Fig. 5. Como se puede observar, el circuito consigue la respuesta explicada de forma teórica en la sección II y representada en la Fig. 2(b). Por otro lado, la sensibilidad en frecuencia del discriminador para el mismo conjunto de pares de tensión de control se muestra en la Fig. 6. Este discriminador es capaz de cubrir el rango de frecuencias de 1.05 a 2 GHz con una sensibilidad mejor de 45 V/GHz y 21 V/GHz para el primer y segundo modo respectivamente. Además, estos resultados serían mejores si se ajustasen los pares de tensión de control para mantener Δ_i constante, obteniendo una respuesta más uniforme. La baja sensibilidad obtenida en el rango de frecuencias superior es debida principalmente a los errores en el trazado de las pistas, como se dijo en la sección III, y a las bajas pérdidas de retorno obtenidas para el segundo modo del resonador (ver Fig. 4(b)).

La simulación llevada a cabo en esta sección ha demostrado por primera vez que es posible incrementar el ancho de banda del discriminador basado en resonadores clásico [7] usando resonadores “dual-mode” ajustables para cubrir dos rangos de frecuencias diferentes, haciendo posible el diseño de discriminadores de frecuencia de banda ancha ultra-compactos. Además, estos resultados pueden ser claramente mejorados ajustando la diferencia relativa entre las frecuencias de resonancia para optimizar la sensibilidad en un rango completo de frecuencias.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un novedoso discriminador de frecuencias “dual-mode”. Este circuito hace uso de dos resonadores microstrip “dual-mode” para doblar el rango de frecuencias de la solución clásica y hacer posible el diseño de discriminadores de frecuencia de banda ancha ultra-compactos. Los resultados obtenidos en la evaluación del resonador fabricado han demostrado un rango de frecuencias de una octava cubriendo la banda de 1.05 a 2 GHz cuando este circuito trabaja dentro del discriminador de de frecuencias.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Consejería de Ciencia, Innovación y Empresa de la Junta de Andalucía bajo los proyectos P09-TIC-5268, MUPHY y una beca FPD (780008), y por la empresa AT4Wireless bajo el contrato 8.06/5.59.3165. Universidad de Málaga - Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech

REFERENCIAS

- [1] M. T. De Melo, M. J. Lancaster and J. S. Hong, "Coplanar Strips Interdigital Delay Line for Instantaneous Frequency Measurements Systems," IEE Colloquium on Advanced Signal Processing for Microwave Applications, Nov. 1996.
- [2] H. Gheidi, A. Banai, " A New Phase Shifter-less Delay Line Method for Phase Noise Measurement of Microwave Oscillators," European Microwave Conference 2008, EuMC 2008.
- [3] E. Ayranci, K. Christensen, and P. Andreani, 'Enhancement of VCO linearity and phase noise by implementing frequency locked loop'. Proc. EUROCON, Warsaw, Poland, September 2007, pp. 2593–2599.
- [4] R. J. Mohr, "Broadband microwave discriminator," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. MTT-11, no. 7, pp. 263–264, Jul. 1963.
- [5] H. Gheidi, A. Banai, "An Ultra-Broadband Direct Demodulator for Microwaves FM Receivers", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 59, No. 8, pp. 2131-2139, Aug. 2011.
- [6] I. Molina-Fernandez, A. Moscoso-Martir, J. M. Avila-Ruiz, R. Halir, P. Reyes-Iglesias, J. de Oliva-Rubio, and A. Ortega-Monux, "Multi-port technology for microwave and optical communications," Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, 2012.
- [7] V. Pirajanchai, K. Janchitrapongvej, J. Nakasuwan, " Frequency Discriminator Using Double Capacitive Layer Distributed RC Network ," International Conference on Communications, Circuits and Systems Proceedings, Jun. 2006.
- [8] Jia-sheng Hong, "Reconfigurable Planar Filters," IEEE Microwave Magazine, Vol. 10, No. 6, pp. 73-83, Oct. 2009.
- [9] Wenxing Tang, and Jia-Sheng Hong, " Varactor-Tuned Dual-Mode Bandpass Filters IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 58, No. 8, pp. 2213-2219, Aug. 2010.
- [10] "MA46 Series data sheet," M/A COM, Lowell, MA.
- [11] "HSCH-9161 Detector Diode Data Sheet," Avago Technologies.
- [12] "OPA656 Operational Amplifier Datasheet," Texas Instrument.