

# Dipolos Impresos Multifrecuencia Cargados con Partículas Metamateriales

Francisco Javier Herraiz Martínez<sup>(1)</sup>, Luís Enrique García Muñoz<sup>(1)</sup>, Vicente González Posadas<sup>(2)</sup>,  
Daniel Segovia Vargas<sup>(1)</sup>

fjherraiz@tsc.uc3m.es, legarcia@tsc.uc3m.es, vgonzal@diac.upm.es, dani@tsc.uc3m.es

<sup>(1)</sup> Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad Carlos III de Madrid. Avenida de la  
Universidad 30, 28911, Leganés (Madrid).

<sup>(2)</sup> Dpto. de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid. Carretera de  
Valencia Km. 7, 28031, Madrid.

**Abstract-** Multi-frequency printed dipoles based on antipodal printed dipoles loaded with metamaterial particles are presented. Split Ring Resonators (SRRs) are used as metamaterial particles in order to obtain fully printed and planar antennas. First, a simplified model of these antennas is developed. This model is based on a printed dipole loaded with the equivalent circuit of the SRRs. This model shows that the working frequencies are very close to the self-resonant frequencies of the dipole and the SRRs. Moreover, a dual-frequency printed dipole is designed, manufactured and measured. This dipole works simultaneously at 1.32 GHz and 2.82 GHz. Finally, the previous idea is extended to increase the bandwidth of the dual-band dipoles and develop multi-frequency printed dipoles (printed dipoles which work simultaneously at three or more frequencies). This is made by using SRRs with different dimensions.

## I. INTRODUCCIÓN

Las antenas multifrecuencia son dispositivos radiantes que funcionan de forma simultánea en varias bandas de frecuencia. Hoy en día, este tipo de antenas resultan especialmente interesantes debido a la gran demanda que existe de servicios de telecomunicaciones inalámbricos. Además, tanto la industria como los usuarios de los terminales móviles valoran muy positivamente que las antenas sean de dimensiones reducidas. Por estas razones se está realizando un gran esfuerzo en el desarrollo de antenas impresas que satisfagan estos requisitos.

El empleo de dipolos impresos como elementos radiantes de terminales inalámbricos (ordenadores portátiles, PDAs, teléfonos móviles, ...) supone una opción bastante adecuada. Sin embargo, en la literatura no existen muchos ejemplos de dipolos impresos que funcionen de forma simultánea en más de una frecuencia con características de radiación similares. El procedimiento más simple para conseguir un dipolo impreso de doble banda consiste en emplear dos dipolos de dimensiones distintas alimentados por un único puerto (por ejemplo [1]), pero evidentemente esta solución trivial supone un aumento de las dimensiones del elemento radiante. Las otras propuestas que encontramos en la literatura ([2]-[3]) sí consiguen una doble resonancia a partir de un único dipolo. En [2] se propone la realización de unas ranuras con forma de U dentro de cada brazo del dipolo, mientras que en [3] se introducen unos resonadores compactos. En ambos casos, la relación entre las frecuencias de funcionamiento es siempre superior a 2.17 y la frecuencia de la resonancia adicional la

fija el motivo que se incorpora dentro de cada brazo del dipolo. Por tanto, es poco probable que se puedan conseguir ratios entre las frecuencias de funcionamiento más pequeños, puesto que para ello habría que aumentar el tamaño de los motivos, con lo que no se podrían introducir dentro del dipolo.

En esta comunicación se propone un novedoso procedimiento para obtener antenas multifrecuencia a partir de un dipolo impreso cargado con partículas metamateriales. Estas partículas se imprimen al lado del dipolo o en la cara opuesta del sustrato y de este modo se acoplan al mismo. Esto permite que el dipolo impreso permanezca inalterado y que las frecuencias de resonancia dependan de las dimensiones de las partículas y del dipolo casi de forma independiente. De esta forma, se pueden diseñar antenas multifrecuencia con una relación de funcionamiento arbitraria.

Hasta la fecha, los autores tienen conocimiento de un único trabajo en el que se empleen las características extraordinarias de los metamateriales para mejorar las prestaciones de los dipolos impresos [4]. En dicho artículo, se proponen dipolos basados en líneas zurdas consiguiendo una reducción de tamaño importante respecto a los convencionales. Sin embargo, no se conocen trabajos en los que se propongan los metamateriales para conseguir dipolos multifrecuencia.

Los autores de esta comunicación ya han demostrado anteriormente la posibilidad de conseguir elementos radiantes con múltiples frecuencias de funcionamiento a partir de antenas impresas cargadas con partículas metamateriales. En [5] se presentan antenas de tipo parche multifrecuencia mediante el rellenado de las mismas con partículas metamateriales. En ese caso, se proponían estructuras de tipo champiñón de Sievenpiper, que consisten en parches metálicos con vías al plano de masa. Sin embargo, en este trabajo se propone el empleo de partículas del tipo Split Ring Resonator (SRR) consiguiendo antenas impresas totalmente planas.

La estructura de esta comunicación es la siguiente: en la siguiente sección se presenta un modelo equivalente de las antenas propuestas. A partir de este modelo, se diseña un dipolo impreso de doble frecuencia. Además, se presentan los resultados experimentales obtenidos mediante simulación de onda completa y las medidas experimentales de un prototipo.

En la Sección III se presenta un procedimiento para diseñar dipolos con más de dos frecuencias de funcionamiento y dicho procedimiento también se propone para aumentar el ancho de banda de los dipolos de doble frecuencia. Finalmente, las conclusiones de esta comunicación se presentan en la Sección IV.

## II. DIPOLO IMPRESO DE DOBLE FRECUENCIA

### A. Modelo Equivalente

Las antenas propuestas están basadas en un dipolo antipodal impreso en las dos caras de un sustrato FR-4 ( $\epsilon_r = 4.5$ ) con un espesor de 0.50 mm. Cada brazo del dipolo se imprime en una cara del sustrato y el dipolo se alimenta mediante una línea de transmisión de tipo antipodal. Finalmente, se suelda un conector SMA en el extremo de la línea.

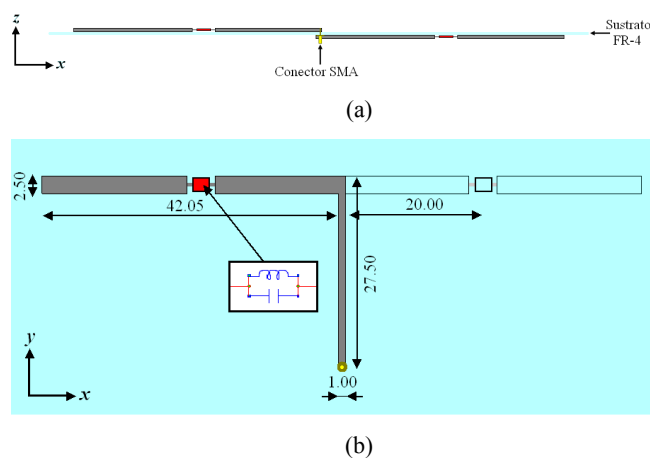


Fig. 1. Dipolo antipodal impreso cargado con resonadores LC paralelo. (Dimensiones en mm). (a) Alzado. (b) Planta.

El modelo circuital equivalente de las partículas metamateriales SRRs es un tanque LC paralelo [6]. Por esta razón, proponemos el modelo simplificado de la Fig. 1 para estudiar el comportamiento de un dipolo impreso antipodal cargado con partículas metamateriales.

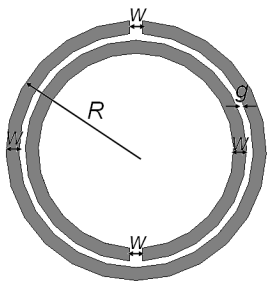


Fig. 2. Split Ring Resonator (SRR) y sus parámetros de diseño.

La Fig. 2 muestra el esquema de un SRR. Inicialmente, los valores considerados son:  $R = 4$  mm,  $W = 0.40$  mm y  $g = 0.20$  mm. De acuerdo con [6], la frecuencia de resonancia de estos SRRs es aproximadamente 2.5 GHz. Por esta razón, los valores de los componentes LC del dipolo de la Fig. 1 se escogen de tal manera que la frecuencia de resonancia de los tanques paralelo sea similar a la frecuencia de resonancia de las partículas SRRs.

Los coeficientes de reflexión simulados (CST ®) para el dipolo convencional y el cargado con los resonadores LC se muestran en la Fig. 3. La frecuencia de resonancia del modo

fundamental del dipolo convencional es 1.53 GHz. Además, se puede observar como el dipolo propuesto presenta el deseado comportamiento de doble banda. La primera resonancia del dipolo cargado prácticamente coincide con la del dipolo convencional, mientras que la segunda resonancia aparece en 2.57 GHz, que es aproximadamente la frecuencia de resonancia los tanques LC paralelos. Esta es una característica importante, puesto que permite diseñar dipolos de doble frecuencia de forma muy sencilla. Para ello se parte de las frecuencias de resonancia propias del dipolo y las partículas. Al combinarlos el desplazamiento en frecuencia que se produce es muy pequeño, como se ha demostrado.

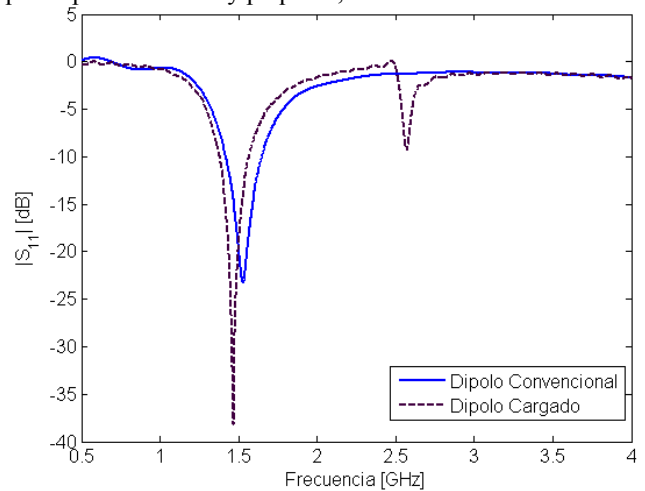


Fig. 3. Parámetro de reflexión simulado (CST ®) del dipolo convencional y el cargado con resonadores LC.

### B. Implementación y Resultados Experimentales

La Fig. 4 muestra la implementación propuesta para el dipolo de doble banda. Acoplamos cuatro SRRs en cada brazo del dipolo. Estos SRRs se imprimen en la cara opuesta a cada brazo del dipolo. De este modo, el dipolo permanece inalterado y se pueden diseñar dipolos de doble frecuencia con relaciones de funcionamiento arbitrarias. Tanto la configuración como las posiciones de los SRRs han sido escogidas para obtener una buena adaptación de la resonancia adicional.

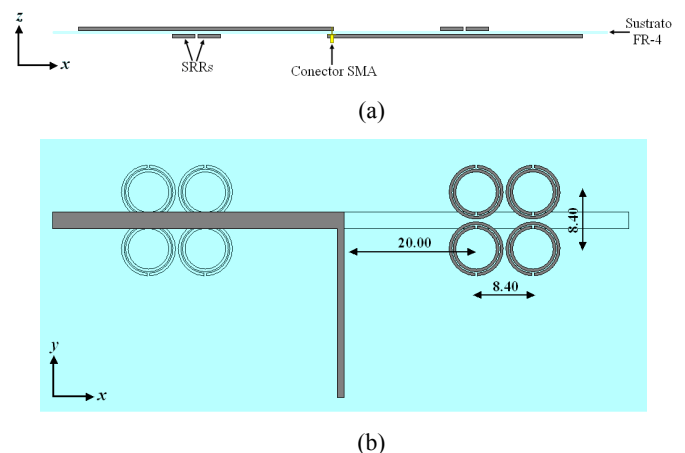


Fig. 4. Dipolo antipodal impreso cargado con resonadores LC paralelo. (Dimensiones en mm). (a) Alzado. (b) Planta.

El dipolo convencional y el cargado con los SRRs se han fabricado (Fig. 5). El parámetro de reflexión medido de cada una de estas antenas se muestra en la Fig. 6. Como se puede

observar, el dipolo convencional presenta una única resonancia mientras que el propuesto presenta dos. Además, las frecuencias de resonancias se encuentran muy próximas a las calculadas mediante el modelo equivalente. La segunda resonancia se ha desplazado ligeramente hacia frecuencias superiores debido a los acoplos mutuos y a la resolución de nuestro laboratorio a la hora de fabricar los prototipos.

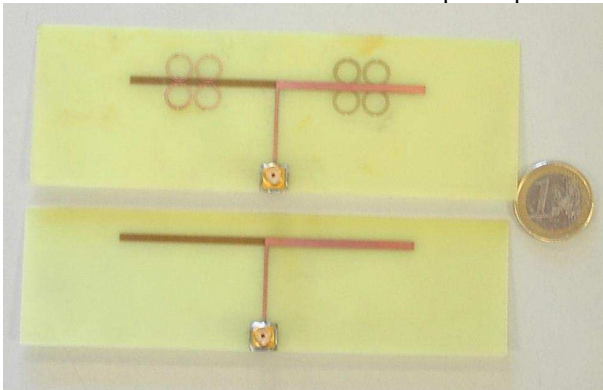


Fig. 5. Fotografía de los prototipos fabricados. Arriba: Dipolo cargado con SRRs. Abajo: Dipolo convencional.

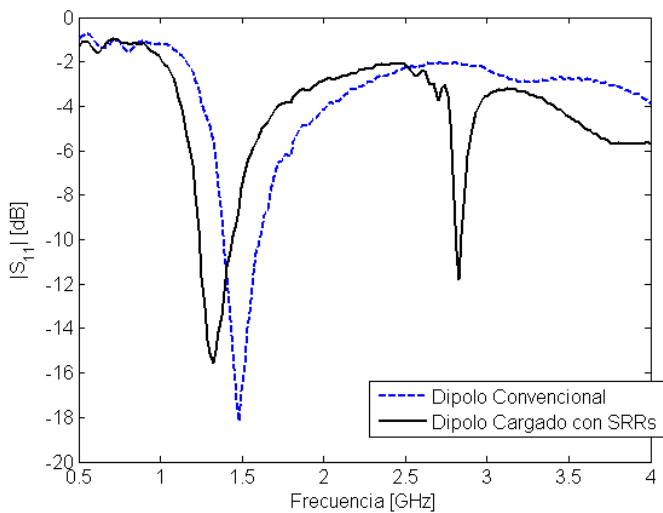
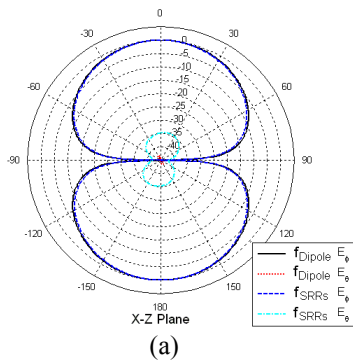
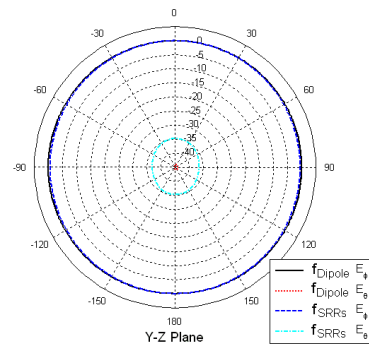


Fig. 6. Parámetro  $|S_{11}|$  medido de los prototipos.

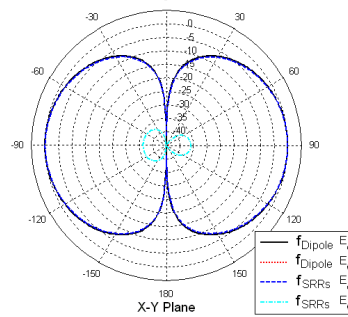
Los diagramas de radiación simulados con CST ® se muestran en la Fig. 7. Es importante destacar que las componentes copolares son similares a ambas frecuencias de funcionamiento, tal y como se deseaba. Además, se aprecian valores de componente contrapolar bastante bajos en ambas frecuencias de funcionamiento.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Diagramas de radiación simulados (CST ®) del dipolo de doble frecuencia. La componente copolar es similar a ambas frecuencias de funcionamiento y la contrapolar es despreciable, sobre todo para la primera frecuencia. (a) Plano X-Z. (b) Plano Y-Z. (c) Plano X-Y.

### III. DIPOLOS IMPRESOS MULTIFRECUENCIA

En la Sección anterior todos los SSRs presentaban las mismas dimensiones. En esta Sección consideraremos que cada brazo del dipolo tiene acoplados un par de SRRs con unas dimensiones ligeramente distintas. En concreto, se propone que el radio exterior de los SRRs inferiores sea ligeramente diferente al de los superiores. De este modo, se consiguen dipolos multifrecuencia (dipolos impresos con más de dos frecuencias de funcionamiento simultáneas).

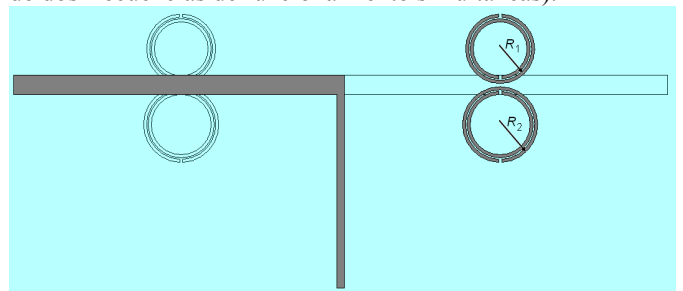


Fig. 8. Esquema de los dipolos impresos multifrecuencia.

De acuerdo con la Fig. 8, consideramos el caso con  $R_2 = R_1 + 0.4$  mm. Entonces, las frecuencias de resonancia de los anillos se encuentran separadas 0.22 GHz, lo cual permite diseñar un dipolo de triple frecuencia.

La Fig. 9 muestra el parámetro de reflexión simulado con CST ® para el dipolo de triple frecuencia propuesto. Las tres resonancias se pueden apreciar claramente. Además, también están representados los parámetros  $|S_{11}|$  de los dipolos cargados con SRRs iguales y de radio exterior  $R = R_1$  y  $R = R_2$ . Esta Fig. muestra que las tres resonancias del dipolo de triple frecuencia se deben a las resonancias del dipolo y cada uno de los pares de SRRs de diferente radio exterior. Hay que

destacar que esta característica facilita el diseño de estas antenas.

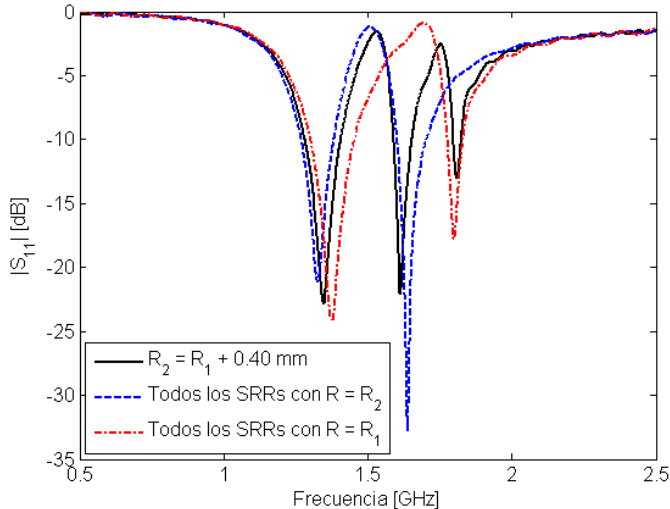


Fig. 9. Parámetro de reflexión simulado del dipolo impreso de triple frecuencia. El mismo parámetro para los dipolos cargados con SRRs de las mismas dimensiones también se muestra.

Una de las principales desventajas de los metamateriales es su reducido ancho de banda. Este inconveniente se puede apreciar en los ejemplos anteriores en los que los anchos de banda de las resonancias adicionales son inferiores al de la resonancia fundamental del dipolo. El procedimiento de emplear SRRs con dimensiones distintas para conseguir múltiples resonancias se puede emplear para aumentar el ancho de banda de la resonancia adicional que se consigue en el dipolo de doble frecuencia presentado en la Sección anterior. Para ello, se puede considerar el caso de la Fig. 8 con  $R_2 = R_1 + 0.15$  mm. Así, la diferencia entre las frecuencias de resonancia de los SRRs es muy pequeña y ambas resonancias se juntan produciendo una segunda banda de funcionamiento con un mayor ancho de banda. El parámetro de reflexión de este ejemplo se muestra en la Fig. 10. Se puede observar como el ancho de banda es mayor que en los dipolos de doble frecuencia presentados en la Sección II.

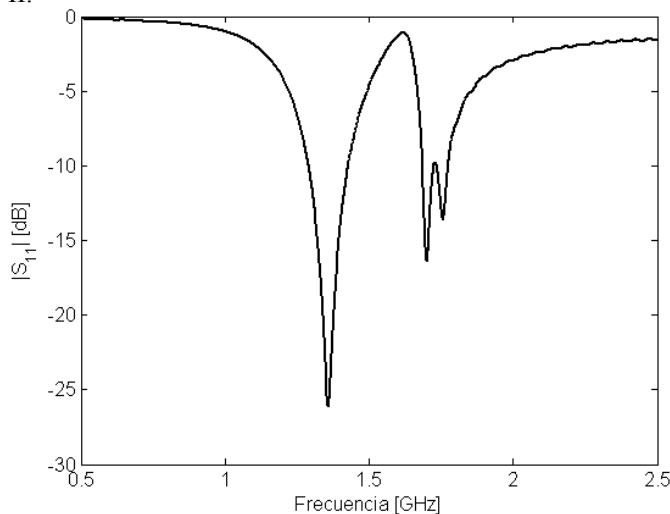


Fig. 10. Coeficiente de reflexión simulado de la antena de doble frecuencia con mayor ancho de banda en la segunda banda.

#### IV. CONCLUSIONES

En esta comunicación se han presentado los dipolos impresos multifrecuencia cargados con partículas metamateriales. Se han empleado SRRs para conseguir antenas impresas totalmente planas. En primer lugar, se han estudiado los dipolos de doble frecuencia. Se ha propuesto un modelo simplificado de estas antenas que ha servido para demostrar que las frecuencias de funcionamiento se encuentran muy próximas a las del dipolo y los SRRs. Esto permite un fácil diseño para cualquier par de frecuencias de funcionamiento. Además, se ha diseñado, construido y medido un prototipo, con unos resultados similares a los obtenidos mediante el modelo equivalente y la simulación de onda completa. Finalmente, se ha propuesto cargar los dipolos con SRRs de diferentes dimensiones para obtener antenas de triple frecuencia. El mismo concepto se ha aplicado para aumentar el ancho de banda de la resonancia adicional que se obtiene en el dipolo de doble frecuencia.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto TEC2006-13248-C04-04/TCM del MEC. F. J. Herraiz Martínez es becario del programa FPU del MEC.

#### REFERENCIAS

- [1] V. Stojilkovic, S. Suganthan and M. Benhaddou, "A novel dual-band centre-fed printed dipole antenna," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2003, vol. 2, pp. 938 - 941.
- [2] C.-M. Su, H.-T. Chen and K.-L. Wong, "Printed dual-band dipole antenna with U-slotted arms for 2.4/5.2 GHz WLAN operation," *Electronics Letters*, vol. 38, no. 22, pp. 1308-1309, October 2002.
- [3] Y. F. Liu, Q. Xue, C. H. Chan, "A novel dual-band printed-dipole antenna using CRR structure," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 41, no. 2, pp. 105 - 106, April 2004.
- [4] H. Iizuka, P. S. Hall, "Left-Handed dipole antennas and their implementations," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol 55, no. 5, pp. 1246-1253, May 2007.
- [5] F. J. Herraiz-Martínez, L. E. García-Muñoz, V. González-Posadas and D. Segovia-Vargas, "Multi-frequency and dual mode patch antennas partially filled with Left-Handed structures", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, accepted for publication.
- [6] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martín, R. Marqués, F. Falcone, T. Lopetegui, M. A. G. Laso, J. García, I. Gil and M. Sorolla, "Equivalent circuit models for split ring resonators and complementary split ring resonators coupled to planar transmission lines," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, pp. 1451-1461, April 2005.