

Estudio de medios EBG basados en estructuras metálicas en forma de paralelepípedo

Ángel J. García-Collado⁽¹⁾, José Margineda⁽²⁾, Ernesto Martín⁽²⁾, Gregorio J. Molina-Cuberos⁽²⁾

ajgarcia@ucam.edu, jmargi@um.es, ernesto@um.es, gregomc@um.es

⁽¹⁾ Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Avanzadas. Universidad Católica San Antonio. Avda. Los Jerónimos s/n, Guadalupe, Murcia

⁽²⁾ Dpto. de Electromagnetismo y Electrónica. Universidad de Murcia. Campus de Espinardo, Espinardo, Murcia

Abstract- In this paper microstrip lines with periodic metallic structures on both sides have been studied. The basic unit cell is a parallelepiped with different metallization at the edges. The effects on the transmission in a standard microstrip line have been analysed by using both experimental and simulation (CST Microwave Studio®) techniques, obtaining an EBG behaviour similar to the one obtained with mushroom-like structures. The proposed structures present advantages in band gap size. Furthermore, the response does not depend on the number of rows at the sides of the microstrip line.

I. INTRODUCCIÓN

En un trabajo anterior [1] presentamos la posibilidad de obtener medios *EBG* (*Electromagnetic Band Gap*) basados en la inserción de estructuras quirales tipo manivela [2]-[5]. El medio *EBG* se obtiene añadiendo las estructuras quirales a los lados de una línea de transmisión microstrip de forma análoga al uso habitual de estructuras tipo seta o *mushroom* (*mushroom-like EBG*), desarrolladas por Sievenpiper et al. [6]. En el citado trabajo analizábamos las ventajas de las estructuras propuestas, denominadas 4CR (*4 Crank Resonator*), centradas fundamentalmente en dos aspectos: un mayor ancho de banda del *band gap* y la obtención de éste mediante una única fila de estructuras a cada lado de la línea.

En un intento por comprender mejor el funcionamiento de las estructuras propuestas y obtener criterios de diseño, se han estudiado variaciones de las estructuras utilizadas, con simetría quiral o sin ella. Los materiales aquí presentados están contruidos a partir de celdas en forma de paralelepípedo con aristas total o parcialmente conductoras y los resultados obtenidos parecen prometedores.

Los medios *EBG* son estructuras artificiales, por lo general periódicas, que sirven para limitar la propagación de ondas electromagnéticas en una banda de frecuencias específica [7], [8]. Las estructuras *EBG* son realizadas mediante combinación de materiales dieléctricos y conductores. En nuestro caso, trabajamos con estructuras tridimensionales muy compactas y que pueden ser integradas fácilmente en placas de circuito impreso (PCB). Las principales ventajas de estas estructuras son su bajo coste, la facilidad de fabricación mediante tecnologías de circuito impreso y la flexibilidad para su escalamiento en frecuencia. La existencia de diferentes parámetros constructivos permite el diseño de medios según necesidades específicas, tales como anchos de banda amplios o bandas de frecuencia predeterminadas.

En este trabajo analizamos experimentalmente varias estructuras *EBG* concebidas como variaciones geométricas de la presentada en [1] y se contrastan los resultados mediante simulación numérica con *CST Microwave Studio*®.

II. PLANTEAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LOS MEDIOS

Analizamos los resultados obtenidos mediante comparación del comportamiento de las estructuras propuestas con el de una línea microstrip estándar. Todos los dispositivos están contruidos sobre sustrato FR-4. Los medios *EBG* se obtienen colocando a ambos lados de la línea las diferentes estructuras planteadas, una o más filas. En la Figura 1(a), se muestra la línea de transmisión y un ejemplo de medio *EBG* contruido mediante la inserción de cuatro filas a cada lado de la misma de estructuras 4CR, Figura 1(b).

Se ha adoptado el criterio propuesto por diferentes autores según el cual se define la banda prohibida de un medio *EBG* como la región de frecuencias en la que el parámetro de transmisión S_{21} está por debajo de -10 dB respecto del valor medio de dicho parámetro en la banda de frecuencias considerada. En nuestro caso, este estudio se lleva a cabo en la banda de 4 a 16 GHz.

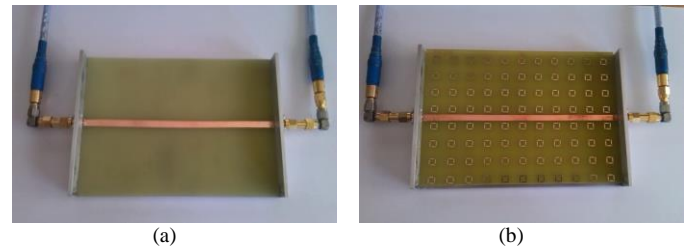


Fig. 1. (a) Línea de transmisión estándar. (b) Medio *EBG* con 4 filas de estructuras de tipo 4CR.

A. Línea de transmisión

Es una línea microstrip sobre una placa con sustrato FR-4 estándar ($\epsilon_r = 4.3$, a 10 GHz), de dimensiones 150 x 105 mm y grosor 2.4 mm. La anchura de la pista es 5 mm para tener una impedancia característica Z_0 de 50 Ω [9]. El grosor de la línea es de 35 μm y está realizada sobre cobre, Fig. 1(a).

B. Línea de transmisión con manivelas de tres segmentos (4CR)

A ambos lados de la línea microstrip descrita, se insertan filas de estructuras basadas en manivelas (*crank*), que constituyen una celda unidad que denominamos como 4CR,

Figura 2(a). Son estructuras tridimensionales de tres segmentos, con dimensiones $l_1 = l_3 = 3.5$ mm, $l_2 = 2.4$ mm, y con una anchura de segmento $W = 0.6$ mm. La vía (de diámetro 0.25 mm) comunica a través del substrato los dos segmentos, superior e inferior. La distancia entre el extremo del segmento y la vía de la manivela vecina es $s = 0.5$ mm. Se han agrupado cuatro de estas estructuras en forma de paralelepípedo para configurar una celda que maximiza la quiralidad. Estas estructuras han sido documentadas en [5]. La separación entre los elementos situados en la dirección de la línea de transmisión es de 8 mm. Cuando hay más de una fila de inserciones, la separación entre ellas es también de 8 mm. La distancia desde la línea de transmisión a la primera fila de inserciones es de 1.5 mm. Estas dimensiones de diseño han sido calculadas para observar efectos dentro de la banda de estudio.

C. Línea de transmisión con manivelas de cinco segmentos (2ECR)

Se ha modificado la estructura básica de la celda 4CR construyendo un paralelepípedo con dos manivelas de cinco segmentos cada una, Fig. 2(b), que hemos llamado 2ECR (2 Extended Crank Resonator). Es también una estructura quiral. Las dimensiones constructivas son $l_1 = 4.0$ mm, $l_3 = 5.6$ mm con brazos de idénticas magnitudes a ambos lados del substrato, $l_2 = 2.4$ mm y anchura de segmento $W = 0.6$ mm. La vía es igual a la descrita para la estructura 4CR. La distancia entre el extremo del segmento y la vía de la manivela vecina es $s = 0.5$ mm. Las características de simetría de este diseño posibilitan una distribución en la que cada pareja de manivelas pueda ser rotada 90° respecto de su vecina de fila y/o columna [10], teniéndose por lo tanto otro grado de libertad en el diseño del medio *EBG*. La separación entre las inserciones en las dos direcciones del plano es de 5.0 mm. La distancia de la primera fila a la línea de transmisión es de 0.1 mm.

D. Línea de transmisión con estructura con doble L (4BR)

Consiste en una inserción en forma de "L" de dimensiones $l_1 = 5.6$ mm, $l_3 = 4.5$ mm a ambos lados del substrato dieléctrico de grosor 2.4 mm (l_2). La anchura de segmento es, al igual que en los casos anteriores, $W = 0.6$ mm. La estructura se completa con otra pareja de L enfrentadas que constituyen en su conjunto una forma cúbica, Fig. 2(c). La denominamos 4BR (4 Bend Resonator) y es una estructura no quiral. Las inserciones 4BR se distribuyen ordenadamente en el plano del substrato dieléctrico con una distancia entre elementos de 5.25 mm. La distancia de la primera fila a la línea de transmisión es de 0.25 mm.

E. Línea de transmisión con estructuras en forma de paralelepípedo conductor (PR)

Se diseña esta estructura como una variación de la diseñada mediante manivelas de tres segmentos, de forma que los segmentos que se sitúan sobre las dos caras del substrato son alargados hasta alcanzar la vía de la manivela colindante, resultando una estructura en forma de paralelepípedo donde todas las aristas del mismo están metalizadas. La hemos denominado PR (Parallelepiped Resonator). En este caso, $l_1 = l_3 = 4.0$ mm, $l_2 = 2.4$ mm, $W = 0.6$ mm y se mantienen las dimensiones de red indicadas en el punto B de este apartado. Resulta evidente que esta estructura carece de quiralidad.

F. Línea de transmisión con segmentos (8SR)

Por último, se plantea una nueva modificación de la estructura basada en manivelas de tres segmentos de forma que, manteniendo las dimensiones definidas en el punto B, se eliminan las vías metálicas que comunican sendas caras del substrato dieléctrico. La denominamos 8SR (8 Segment Resonator).

A fin de evitar el contacto metálico entre los segmentos metálicos de las estructuras consideradas y el plano metálico que constituye el plano de tierra de la línea microstrip, se ha interpuesto una lámina de material dieléctrico ($\epsilon_r = 3.7$) de 0,4 mm de grosor. Este valor es un nuevo parámetro de diseño que afecta a los resultados obtenidos.

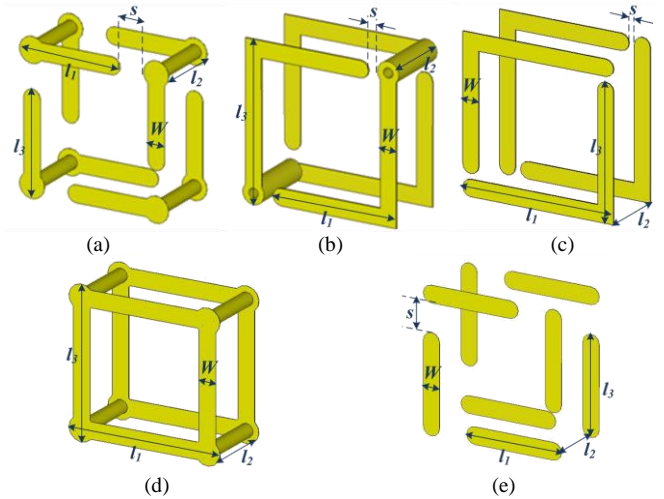


Fig. 2. Estructuras estudiadas. (a) 4CR, (b) 2ECR, (c) 4BR, (d) PR y (e) 8SR. Los valores de los parámetros indicados se encuentran en el texto.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los sistemas de propagación con inclusión de una a cuatro filas de los elementos metálicos 4CR, 2ECR y 4BR han sido construidos y se ha medido experimentalmente su comportamiento en la banda de 4-16 GHz mediante un analizador de redes y un sistema de medición como el observado en la Figura 3. Todo el sistema es convenientemente calibrado para la banda de frecuencias del estudio.

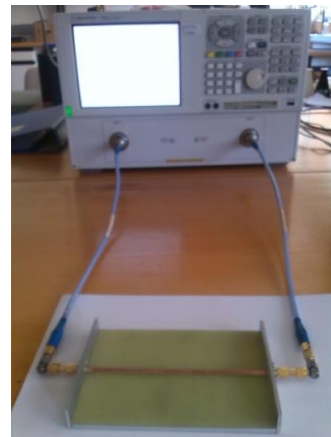


Fig. 3. Sistema de medida experimental basado en un analizador de redes.

Los resultados obtenidos son mostrados en las gráficas de la Figura 4. En todas ellas se representa el parámetro de transmisión S_{21} de la línea de transmisión sin inserciones,

Fig. 1(a), a fin de que sirva de referencia frente a los cambios provocados por la presencia de las filas de inclusiones.

En los tres casos aparece *band gaps* independientemente del número de filas incluidas, lo que difiere del comportamiento de los *mushroom* como ya se indicaba en [1]. Por otro lado la respuesta de la estructura 4CR, Fig. 4(a), y la de la 4BR, Fig. 4(c), son muy similares, teniendo en cuenta que la primera es quiral y la segunda no lo es, se deduce que la presencia de bandas prohibidas no está ligada al comportamiento quiral de la estructura.

Además se observa que las estructuras con vías (4CR y 2ECR) presentan más bandas, Fig. 4(a) y (b), que la que no tiene (4BR), Fig. 4(c), lo que parece indicar que hay fenómenos de resonancia ligados a la estructura plana y otros a la presencia de vías.

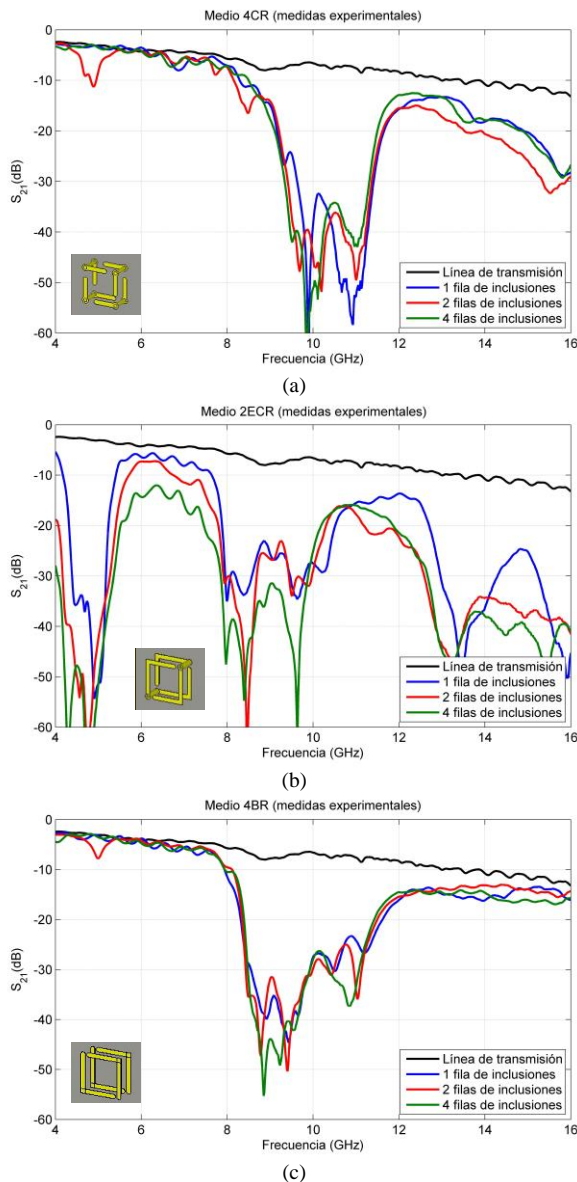


Fig. 4. Resultados experimentales. (a) Parámetro S_{21} (dB) de la línea de transmisión con estructuras 4CR. (b) S_{21} (dB) de la línea de transmisión con estructuras 2ECR. (c) S_{21} (dB) de la línea con estructuras 4BR.

Estos medios de propagación han sido también estudiados por simulación numérica mediante el software comercial *CST Microwave Studio*[®]. En todos los casos se encuentra un buen acuerdo entre los resultados de la simulación y los resultados experimentales. En la Figura 5 se presenta, a modo de

ejemplo, los resultados para la estructura 4CR comparables a los mostrados en la Figura 4(a).

En las Figura 6 y 7 se muestran respectivamente los resultados de la simulación con las estructuras PR y 8SR. La primera presenta también *band gaps*, pero no la segunda.

El análisis del conjunto de los resultados lleva a varias interesantes observaciones. Las estructuras en forma de paralelepípedo con aristas parcialmente conductoras resultan ser una alternativa interesante para obtención de medios *EBG*, pero es necesario la presencia de codos y/o vías de comunicación entre ambas caras de la placa impresa y no se obtiene este tipo de respuesta cuando sólo hay segmentos conductores (Fig. 7). Aparecen bandas ligadas a las vías y otras más pronunciadas relativas a los codos, pero no es necesario que la estructura sea quiral, Fig. 4(c).

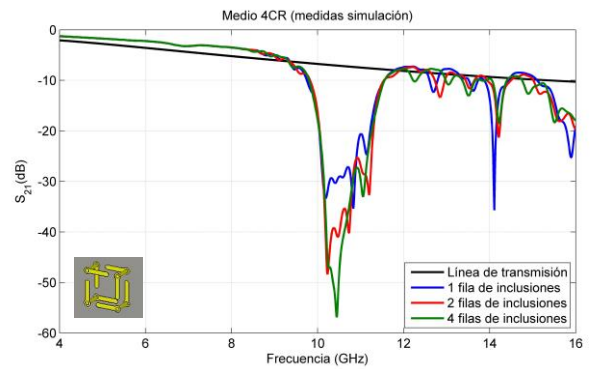


Fig. 5. Resultados de simulación: Parámetro S_{21} (dB) de la línea de transmisión con estructuras 4CR.

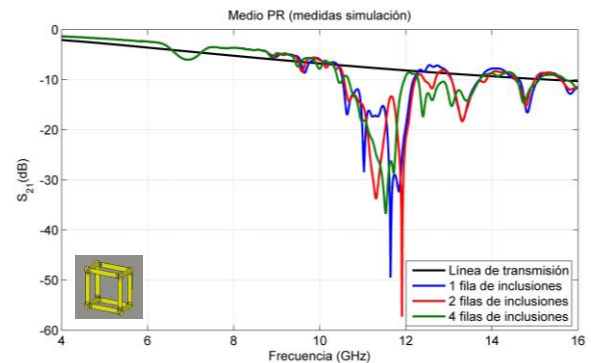


Fig. 6. Resultados de simulación. Parámetro S_{21} (dB) de la línea de transmisión con estructuras PR.

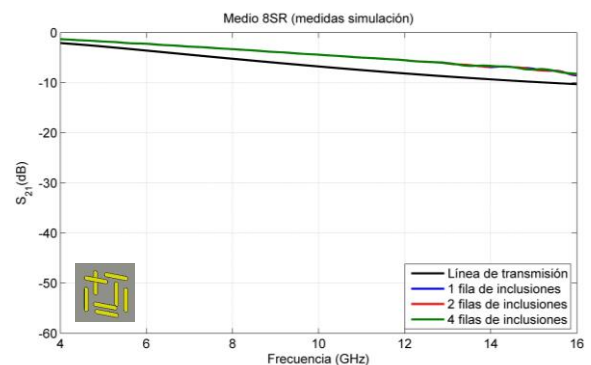


Fig. 7. Resultados de simulación Parámetro S_{21} (dB) de la línea de transmisión con estructuras 8SR.

Aunque la estructura PR puede ser utilizada para obtener medios *EBG*, las alternativas 4CR, 2ECR y 4BR resultan más

interesantes ya que ofrecen más parámetros de diseño: tamaño del paralelepípedo, longitud de las aristas metalizadas (o espacios no metalizados) y anchura de las aristas metalizadas.

Se han realizado simulaciones con elementos individuales comprobando que aparece un comportamiento del mismo tipo aunque la periodicidad magnifica el efecto. Además, con la disposición periódica, se puede jugar con la distancia longitudinal entre las diversas estructuras como parámetro de red. Lógicamente la distancia transversal entre las estructuras afecta sólo ligeramente, dado que la inclusión de más de una fila de estructuras afecta poco al resultado.

En todas las figuras de resultados se observa una caída importante en la transmisión en las zonas de alta frecuencia. Ello es debido al comportamiento del sustrato FR-4. La respuesta puede ser optimizada empleando sustratos de mejores prestaciones. Las características del sustrato (permitividad, pérdidas y grosor) pueden ser empleadas como parámetros de diseño.

IV. CONCLUSIONES

Siguiendo el camino abierto en trabajos previos, se ha analizado experimentalmente y por simulación numérica una línea microstrip con diversas estructuras en forma de paralelepípedo con aristas total o parcialmente conductoras, colocadas a ambos lados. Algunas de estas estructuras presentan geometría quiral y otras no. Se ha comprobado que, en la mayoría de los casos, presentan *band gaps* resultando una interesante alternativa a las estructuras tipo seta o *mushroom*, con algunas ventajas sobre éstas. Se obtienen bandas prohibidas más anchas; una sola fila de estructuras a cada lado de la línea es suficiente para obtener la respuesta deseada. La quiralidad no es imprescindible para obtener este tipo de respuesta. La condición para este tipo de estructuras es que existan codos conductores y/o vías de comunicación entre los conductores de las dos caras del sustrato dieléctrico. En este caso, las estructuras admiten muchos parámetros de diseño que pueden ser utilizados para ajustar las bandas de “no propagación”.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación TEC2014-55463-C3-1-P.

REFERENCIAS

- [1] García-Collado, A. J., Margineda, J., Martín, E., Molina-Cuberos, G. J., “Diseño de medios EBG basados en estructuras quirales”, *XXIX Simposium Nacional URSI*, 2014.
- [2] Molina-Cuberos, G. J., García-Collado, A. J., Margineda, J., Nuñez, M. J., & Martín, E., “Electromagnetic activity of chiral media based on crank inclusions”, *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 19(5), 278-280, 2009.
- [3] García-Collado, A. J., Molina-Cuberos, G. J., Margineda, J., Nuñez, M. J., & Martín, E., “Isotropic and homogeneous behavior of chiral media based on periodical inclusions of cranks”, *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 20(3), 175-177, 2010.
- [4] Barba, I., Cabeceira, A. C. L., García-Collado, A. J., Molina-Cuberos, G. J., Margineda, J., & Represa, J., *Quasi-planar Chiral Materials for Microwave Frequencies en Electromagnetic Waves in Complex Matter*, A. Kishk Ed. InTech-Open Access Publisher, 97-116, 2011.
- [5] García-Collado, A. J., Molina-Cuberos, G. J., Nuñez, M. J., Martín, E., & Margineda, J. “Negative refraction of Chiral Metamaterial Based on Four Crank Resonators”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 26(7), 986-995, 2012.
- [6] Sievenpiper, D., Zhang, L., Broas, R. F., Alexopolous, N. G., & Yablonovitch, E. “High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band”, *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 47(11), 2059-2074, 1999.
- [7] Engheta, N., & Ziolkowski, R. W. (Eds.), *Metamaterials: physics and engineering explorations*, John Wiley & Sons, 2006.
- [8] Caloz, C., & Itoh, T., *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications*. John Wiley & Sons, 2005.
- [9] Pozar, D. M., *Microwave engineering*, John Wiley & Sons, 2009.
- [10] Martínez-Soler I. J., Molina-Cuberos, G. J., García-Collado, A. J., Margineda, J., Nuñez, M. J., & Martín, E., “Metamateriales quirales basados en manivelas de cinco segmentos”, *XXVII Simposium Nacional URSI*, 2012.