

Estudio del comportamiento de una línea microstrip en presencia de estructuras EBG tipo cruz

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

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

⁽¹⁾Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Avanzadas. Universidad Católica San Antonio.

Avda. de los Jerónimos s/n, Guadalupe, Murcia.

⁽²⁾Departamento de Electromagnetismo y Electrónica. Universidad de Murcia.

Campus de Espinardo, Espinardo, Murcia.

Abstract—In this work, the existence of electromagnetic band-gaps (EBG) on microstrip transmission lines by including cross-shaped structures are studied in the frequency range of 8-15 GHz and compared with mushrooms type structures. The results show that the new structure behaves as a medium EBG and presents some advantages over mushroom inclusions, such as a double band-gap in the frequency range under study, which is related with its capacitive impedance. Furthermore, the incorporation of more than one row of cross-shaped elements on either side of the microstrip line does not significantly varies the results obtained using a single row, which allows more compact designs.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha suscitado en la comunidad científica un gran interés el empleo de estructuras EBG (*Electromagnetic Band-gap*). Su desarrollo procede del fenómeno óptico *Photonic Band-gap* (PBG) en estructuras periódicas. Las EBG son estructuras artificiales, generalmente periódicas, que pueden eliminar la propagación de ondas electromagnéticas en una banda de frecuencias específica. El comportamiento de estas estructuras está basado en el conocido efecto de reflexión Bragg, según el cual la radiación que sale reflejada de cada una de las celdas que forman la estructura periódica forma un frente de onda en interferencia constructiva.

Las estructuras EBG son compactas y presentan interesantes ventajas como la supresión de las ondas de corriente superficiales que tienen lugar en dispositivos electrónicos, para los que se requiere alta eficiencia (antenas, filtros, etc.) [1]. La propagación de las ondas de superficie provoca la aparición de efectos no deseados, especialmente en aplicaciones para comunicaciones tales como las antenas y circuitos miniaturizados [2]. En las antenas reducen su eficiencia y su ganancia, limitan el ancho de banda, aumentan la radiación de tipo *endfire*, aumentan los niveles de polarización cruzada y limitan el rango de frecuencias aplicable. En la miniaturización de circuitos, las ondas de superficie dan lugar a la aparición de acoplamientos entre los diferentes elementos que los conforman.

Recientemente, se ha demostrado que incluyendo inserciones metálicas en las inmediaciones de una línea de transmisión, se puede obtener una estructura periódica EBG con características similares, dentro de cierta banda de frecuencias, a una línea de transmisión de baja dispersión, donde las señales viajan a una velocidad de fase menor [3].

En este trabajo estudiamos diferentes estructuras EBG y analizamos los efectos de su presencia frente a una línea de transmisión estándar sin ellas. Partimos del análisis de una estructura EBG bien estudiada en la bibliografía existente, la conocida como *mushroom-like EBG* [4], y planteamos variaciones de la misma que mejoran su comportamiento. Analizamos los efectos producidos al añadir estructuras de tipo *mushroom* a ambos lados de la línea y comparamos los resultados con los obtenidos con las estructuras planteadas, que denominaremos de tipo cruz. Llevaremos a cabo este estudio haciendo uso de la herramienta de simulación numérica *CST Microwave Studio*, que utiliza un algoritmo de integración con el que se analizarán los parámetros S de las estructuras periódicas diseñadas.

II. PLANTEAMIENTO Y ESTRUCTURAS EBG ANALIZADAS

Para llevar a cabo este estudio analizaremos en primer lugar la respuesta de una línea microstrip estándar. Posteriormente, sobre ella y a ambos lados de la misma, incluiremos una o más filas de estructuras EBG. A través de la obtención de los parámetros S, y especialmente del análisis del parámetro de transmisión, se estimará la banda prohibida de las estructuras bajo estudio. El intervalo de banda prohibida de la estructura EBG lo definimos como la región de frecuencias en la que el parámetro S_{21} es menor de -10 dB.

Trabajaremos en la banda de 8 a 15 GHz para, en un futuro, realizar medidas experimentales que contrasten con las que aquí se presentan. El estudio de estos medios es fácilmente escalable a otras bandas modificando el tamaño de los elementos que componen la estructura.

La línea microstrip es construida sobre sustrato FR-4 estándar ($\epsilon_r = 4.3$ y $tg(\delta) = 0.025$, a 10 GHz), de dimensiones 105 x 150 mm, con 2.4 mm de grosor (h) y anchura de pista de 4.5 mm (W) para tener una impedancia característica $Z_0 = 50 \Omega$, [5]. El grosor de la línea es de 35 μm y está realizada sobre cobre, Fig. 1 (a).

En este trabajo no se emplea la técnica usual de línea suspendida [1], [4], sino que la línea de transmisión queda construida en el mismo sustrato que los elementos que constituyen el medio EBG.

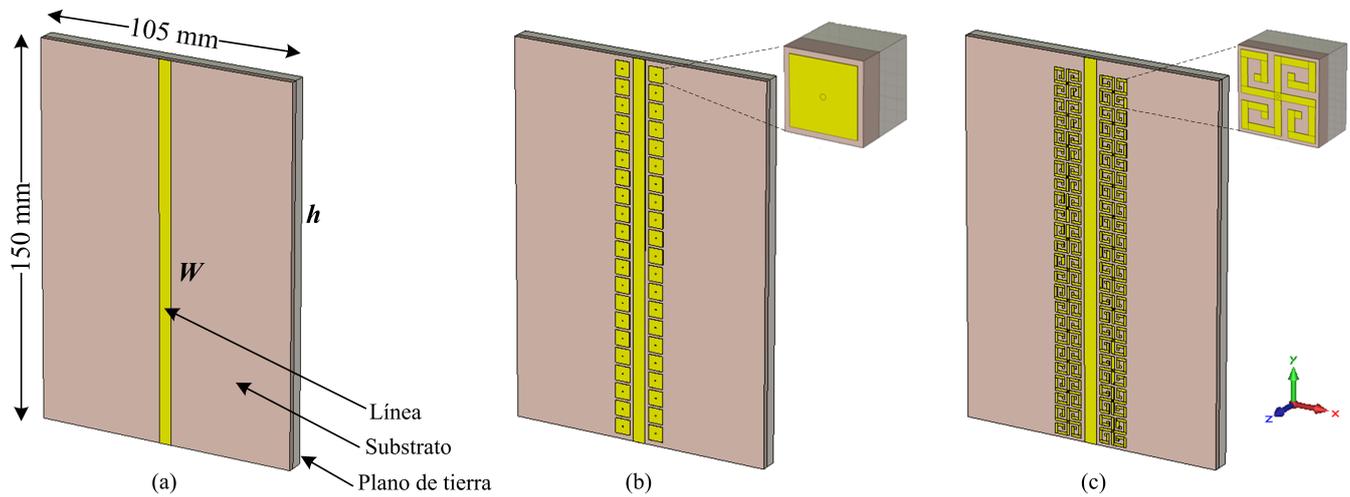


Fig. 1. Estructuras analizadas. (a) Línea de transmisión con las dimensiones principales que la definen (ver texto); (b) línea de transmisión con una fila de elementos *mushroom* a cada lado, y (c) línea de transmisión con una fila de elementos cruz a cada lado. En la parte superior se observa un detalle de los elementos insertados.

A. Estructuras tipo *mushroom*

Una de las inserciones más utilizada en el diseño de estos medios es la de tipo seta o *mushroom*, desarrollada por Sievenpiper et al. [4]. Presenta las características de ser muy compacta y de fácil integración en circuito impreso. Sus principales ventajas son su bajo coste, la facilidad de fabricación mediante tecnologías PCB y la flexibilidad para escalarla a un amplio intervalo de frecuencias. Sin embargo, exhibe características de banda estrecha, lo que restringe su uso en aplicaciones que requieren banda ancha [1], [6].

A la línea microstrip anteriormente descrita se añade una fila de *mushroom* a cada lado de la misma, Fig. 1 (b). La estructura y dimensiones de un *mushroom* quedan descritos mediante el tamaño de parche cuadrado ($D \times D$), con $D = 6.5$ mm y la distancia de separación entre parches $g = 0.5$ mm. El diámetro de las vías metalizadas que conectan el parche con el plano de tierra es de 0.25 mm y su altura coincide con la del substrato dieléctrico sobre el que se implementan ($h = 2.4$ mm, $h \ll \lambda/4$). Por su parte, el grosor del parche metalizado coincide con el de la línea de transmisión. La distancia entre el borde de la línea de transmisión y los parches es de 1.60 mm, Fig. 2. Las dimensiones descritas han sido calculadas para obtener efectos en la banda de estudio [1], [4].

B. Estructuras tipo *cruz*

A fin de mejorar la respuesta de la estructura anterior, se plantea una nueva con forma de cruz con aspas cerradas sobre sí mismas y una vía metálica que la une desde el centro al plano de masa, Fig. 1 (c). Esta distribución presenta geometría quiral, lo que puede afectar a la respuesta del conjunto [7]. Se ha modificado su geometría, añadido más parámetros de diseño con el objetivo de originar nuevas resonancias y conseguir posicionar las regiones de banda prohibida con mayor libertad.

Las dimensiones de la vía (altura y diámetro), del substrato dieléctrico (FR-4) y del grosor de la metalización coinciden

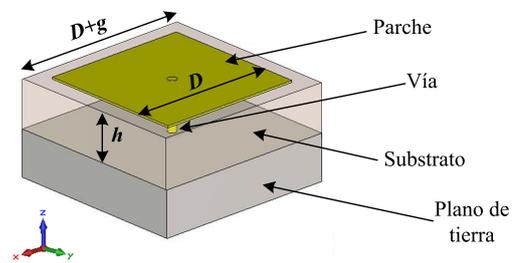


Fig. 2. Dimensiones de la estructura *mushroom*.

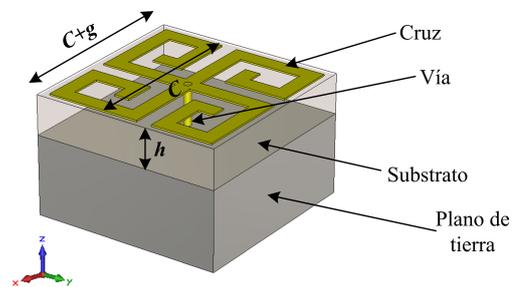


Fig. 3. Principales dimensiones de la estructura en cruz. El ancho de la pista es de 1.0 mm.

con las ya descritas. En la cruz, el grosor de las vías que constituyen las aspas es de 1.0 mm, y la longitud total de cada una de esas aspas es de 18.0 mm, Fig. 3. La dimensión $C+g$ es de 11.5 mm y $C = 11.0$ mm. Al igual que antes, la distancia entre el borde de la línea de transmisión y los elementos metálicos insertados es de 1.60 mm. Estas dimensiones han sido calculadas para obtener efectos significativos en la banda de estudio considerada.

III. RESULTADOS

Es bien conocido, especialmente para las inserciones de tipo *mushroom*, que cuando las dimensiones de su distribución

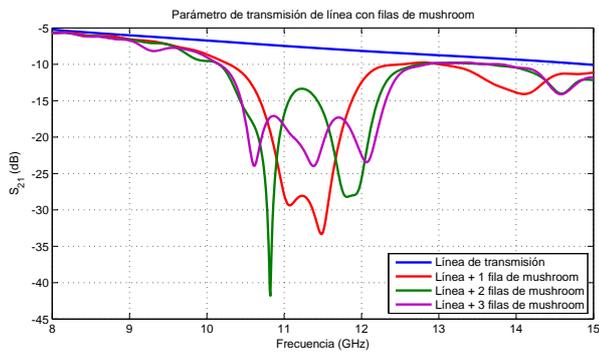


Fig. 4. Módulo del parámetro S_{21} para la estructura con *mushrooms*. Línea de transmisión (azul), línea de transmisión con una fila de *mushroom* a cada lado (rojo), línea de transmisión con dos filas de *mushroom* a cada lado (verde) y línea de transmisión con tres filas de *mushroom* a cada lado (morado).

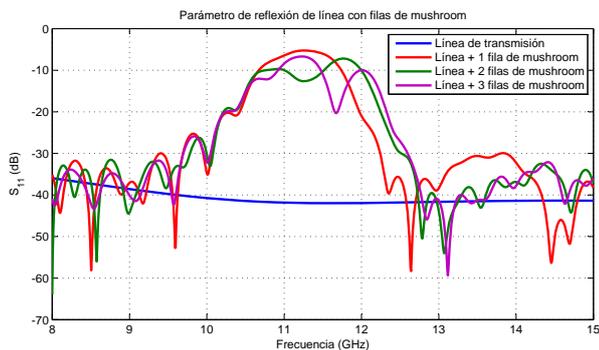


Fig. 5. Módulo del parámetro S_{11} , ídem Fig. 4.

periódica son pequeñas comparadas con la longitud de onda de interés, es posible analizar el material resultante como un medio efectivo con impedancia de superficie Z_S [2]. Su respuesta se puede modelar, en primera aproximación, como un circuito LC, con $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. El valor de la capacidad C depende, para el caso de los *mushroom*, de la proximidad de elementos colindantes, y la inductancia L está relacionada con la longitud de la vía (o grosor del sustrato), [8]. Por debajo de la frecuencia de resonancia la superficie es inductiva y por encima de la frecuencia de resonancia la superficie es capacitiva. En las inmediaciones de ω_0 la impedancia de superficie Z_S es mucho más grande que la impedancia del espacio libre, por lo que ni hay propagación de modos verticales ni horizontales. En la bibliografía existen modelos más complejos que incluyen otras dependencias y determinan con mayor precisión los valores de L y C del modelo circuital del medio EBG, [9].

Modificando las dimensiones de las estructuras que entran en juego en estos medios y las distancias relativas entre las mismas, se puede observar los efectos en una banda de frecuencias de interés y modificar, dentro de unos márgenes, la respuesta que se obtiene.

Para nuestro estudio, y dadas las dimensiones anteriormente definidas, la región frecuencial en la que se presenta el *band-gap* se localiza en torno a 11.5 GHz con un ancho de banda

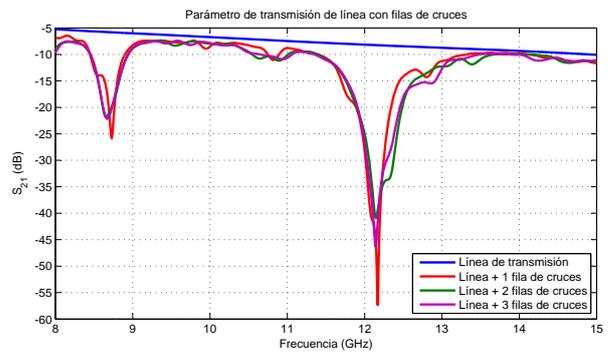


Fig. 6. Módulo del parámetro S_{21} para la estructura con cruces. Línea de transmisión (azul), línea de transmisión con una fila de cruces a cada lado (rojo), línea de transmisión con dos filas de cruces a cada lado (verde) y línea de transmisión con tres filas de cruces a cada lado (morado).

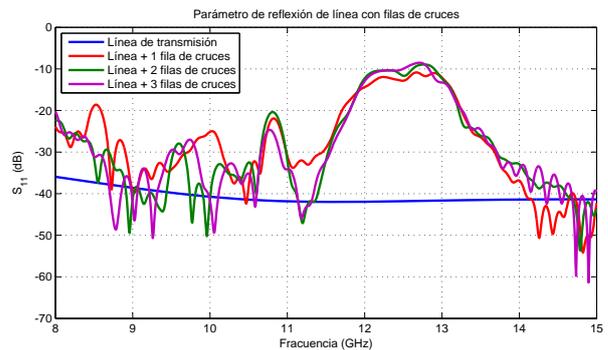


Fig. 7. Módulo del parámetro S_{11} , ídem Fig. 6

de 2.17 GHz, (10.30 - 12.47 GHz), Fig. 4.

Si ampliamos el número de filas a ambos lados de la línea de transmisión, con distribución de los *mushroom* idéntica al caso de una fila única, la respuesta del parámetro de transmisión se ve modificada, apareciendo más mínimos relativos dentro del *band-gap* (tantos como filas a ambos lados de la línea se introducen) e incrementándose levemente el ancho del *band-gap*. En la figura 4 se han representado estos resultados y la respuesta obtenida del análisis de la línea de transmisión sin presencia de elementos laterales.

Por su parte, el estudio del parámetro S_{11} demuestra que en la región de *band-gap* se maximiza la reflexión, Fig. 5.

Al sustituir los *mushroom* por los elementos en forma de cruz, se observan cambios de comportamiento significativos. Del estudio de la Fig. 6 cabe destacar la existencia de una segunda banda prohibida dentro de la banda de interés y un comportamiento muy similar independientemente del número de filas de cruces que se dispongan a ambos lados de la línea de transmisión. El primer *band-gap* detectado está centrado en 8.7 GHz, con una anchura de 0.45 GHz (8.45 - 8.90 GHz), mientras que el segundo *band-gap* está centrado en 12.6 GHz, con una anchura de 1.93 GHz (11.40 - 13.33 GHz).

Este comportamiento viene motivado por la propia geometría del elemento EBG, en el cual, se ha modificado de forma importante el efecto capacitivo existente entre las

aspas de una cruz y las colindantes, siendo ésta la razón de la aparición de una segunda frecuencia de resonancia.

Resulta evidente que la incorporación de más de una fila de cruces a ambos lados de la línea de transmisión no aporta diferencias frente al caso de disponer de una única fila, lo que es una ventaja frente a la disposición de más de una fila de inserciones metálicas a cada lado de la línea de transmisión. La modificación de las dimensiones de las aspás y las separaciones de las vías dentro de las mismas implicarán cambios en la frecuencia a la que se detectan los *band-gap* y la anchura de los mismos. Esto puede ser aprovechado para el diseño de estructuras para bandas de frecuencia determinadas y anchos de *band-gap* predefinidos.

Al igual que sucede en el caso de los *mushroom*, el parámetro de reflexión se hace mayor en la región de resonancia y hay un rizado de S_{11} para el resto de las frecuencias, Fig. 7. De la observación de las figuras 5 y 7 se constata que los resultados obtenidos para este parámetro no difieren sustancialmente. Los valores de S_{11} próximos a 0 dB en el rango de frecuencias de cada *band-gap* indica que la señal que opera a esas frecuencias no puede propagarse en la estructura EBG.

Se ha estudiado el efecto de introducir elementos en forma de cruz con simetría quiral a la representada en la Fig. 3, no observándose cambios significativos en la respuesta del conjunto, por lo que cabe afirmar que el modelo LC de la estructura es el principal factor que afecta al comportamiento electromagnético de la misma.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado el efecto de la inclusión de estructuras 2D en forma de cruz, frente a la inclusión de *mushroom*, con una distribución espacial similar, junto a una línea de transmisión microstrip estándar. Los resultados observados mediante simulación numérica demuestran que las estructuras en cruz se comportan como un medio EBG, con dos regiones de banda prohibida dentro del rango de frecuencias estudiado. Las bandas de frecuencias donde dichos *band-gap* aparecen y su anchura están directamente relacionadas con la geometría de estos elementos, y en concreto, con la impedancia capacitiva que surge del recorrido de las corrientes sobre las aspás de las cruces y, en menor medida, la posición relativa de las inserciones colindantes. Para unas dimensiones dadas, las anchuras de los *band-gap* observados no varían al disponer más filas de inclusiones a ambos lados de la línea de transmisión, lo que lleva a concluir que la incorporación de más de una fila de estos elementos no tiene interés, lo que da lugar a una estructura más compacta que las logradas con otros tipos de inserciones conocidos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (TEC2014-55463-C3-1-P) y Fondos FEDER.

REFERENCIAS

- [1] L. Yang, M. Fan, F. Chen, J. She and Z. Feng, "A novel compact electromagnetic-bandgap (EBG) structure and its applications for microwave circuits," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 53(1), 183-190, 2005.
- [2] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic metamaterials transmission line theory and microwave applications*, John Wiley & Sons, 2005.
- [3] G. Goussetis, A. Feresidis and P. Kosmas, "Efficient analysis, design, and filter applications of EBG waveguide with periodic resonant loads," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 54 (11), 3885-3892, 2006.
- [4] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. Broas, N. G. Alexopolous and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 47(11), 2059-2074, 1999.
- [5] D. M. Pozar, *Microwave engineering*, John Wiley & Sons, 2009.
- [6] S. K. Hampel, O. Schmitz, O. Klemp and H. Eul, "Design of Sievenpiper HIS for use in planar broadband antennas by means of effective medium theory," *Advances in Radio Science*, 5, 87-94, 2007.
- [7] A. J. García-Collado, J. Margineda, E. Martín and G. J. Molina-Cuberos, "Actividad electromagnética de medios quirales basados en manivelas," in *XXIX Simposium Nacional URSI*, Sept. 2014.
- [8] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Mutual coupling reduction of microstrip antennas using electromagnetic band-gap structure," *IEEE AP-S Digest*, vol. 2, pp. 478-481, 2001.
- [9] M. Rahman and M. A. Stuchly, "Transmission line periodic circuit representation of planar microwave photonic bandgap structures," *Microwave and Optical Technology Letters*, 30(1), 15-19, 2001.