

# Estructura Metamaterial Quiral de tipo Fishnet con refracción negativa y bajas pérdidas

Oscar Fernández<sup>(1)</sup>, Álvaro Gómez<sup>(1)</sup>, Gregorio J. Molina-Cuberos<sup>(2)</sup>, Angel. J. García-Collado<sup>(3)</sup>,  
Angel Vegas<sup>(1)</sup>

fernanos@unican.es, gomezal@unican.es, gregomc@um.es, ajgarcia@ucam.edu, vegasa@unican.es

<sup>(1)</sup> Dpto. Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Plaza de la Ciencia s/n, E39005 Santander.

<sup>(2)</sup> Dpto. Electromagnetismo y Electrónica. Universidad de Murcia. Campus de Espinardo, E30100 Espinardo, Murcia.

<sup>(3)</sup> Dpto. Ciencias Politécnicas. Universidad Católica de San Antonio. Avda. Los Jerónimos s/n, E30107 Guadalupe, Murcia.

**Abstract**—In this work the authors present a novel chiral metamaterial structure focused on providing negative refractive index and low losses in a wide frequency band. This new structure is constituted by the combination of two low losses structures, a composite chiral metamaterial and a modified fishnet structure. With the aid of a commercial electromagnetic software simulator, the structure is numerically analyzed and characterized. This new fishnet-like chiral metamaterial features two wide frequency bands wherein the refractive indices are negative and exhibits lower losses than its constituents do.

**Keywords**—quiral; fishnet; metamaterial; bajas pérdidas; índice de refracción

## I. INTRODUCCION

Los metamateriales quirales (Chiral Metamaterials - CMM) presentan una ruta alternativa para conseguir refracción negativa [1]. Gracias a su parámetro de quiralidad, los CMMs pueden presentar índice de refracción negativo para una de las dos ondas circularmente polarizadas, a derechas (+) o izquierdas (—), soluciones de la correspondiente ecuación de ondas (eigenwaves). Un hándicap de estas estructuras, y de los metamateriales en general, son las grandes pérdidas en transmisión que pueden llegar a presentar. Para solventar este problema, se han desarrollado mecanismos para reducir dichas pérdidas, entre los que se puede destacar el uso de estructuras CMM Compuestas [2] (Composite CMM - CCMM).

En un trabajo previo [3], los autores presentaron una estructura CCMM con índice de refracción negativo para una de las eigenwaves,  $|n_+| < 0$ , y con alta Figura de Mérito (Figure of Merit, FoM), es decir bajas pérdidas:

$$\text{FoM}(n_+) = \frac{|\text{Re}(n_+)|}{|\text{Im}(n_+)|} \quad (1)$$

Con el objetivo de avanzar en la reducción de las pérdidas, en esta comunicación se presenta una evolución mejorada de la estructura CCMM [3]. Este nuevo diseño, denominado Metamaterial Quiral tipo Fishnet (FCMM), presenta simetría  $C_4$  y combina la estructura CCMM con una distribución tipo fishnet de bajas pérdidas [4]-[5]. Esta novedosa combinación, mejora la respuesta de [3] al aportar índices de refracción negativos para

cada eigenwave dentro de dos bandas de frecuencia más anchas (0.8 and 0.9 GHz) y también una FoM mejorada, superior a 50 en el 60 % de cada banda.

## II. METAMATERIAL QUIRAL TIPO FISHNET

Las Fig. 1a y b muestran el CCMM y la estructura fishnet modificada utilizada para construir la estructura FCMM propuesta, presentada en Fig. 1c. Como dieléctrico, se ha seleccionado un sustrato de bajas pérdidas, Rogers RO4003C, con una constante dieléctrica de  $\epsilon_r = 3.38$ , tangente de pérdidas  $\tan \delta = 0.0027$ , grosor  $d = 1.52$  mm y grosor de la metalización de 35  $\mu\text{m}$ . Los parámetros geométricos de la estructura se presentan en el pie de Fig. 1. La estructura FCMM se ha caracterizado por medio del algoritmo clásico de recuperación de parámetros propuesto en [6]. Los coeficientes de transmisión y reflexión se han obtenido a través de simulaciones numéricas utilizando el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) del software comercial Keysight EMPro 3D EM<sup>®</sup>. Para todas las simulaciones se ha considerado una dependencia temporal del tipo  $e^{j\omega t}$ .

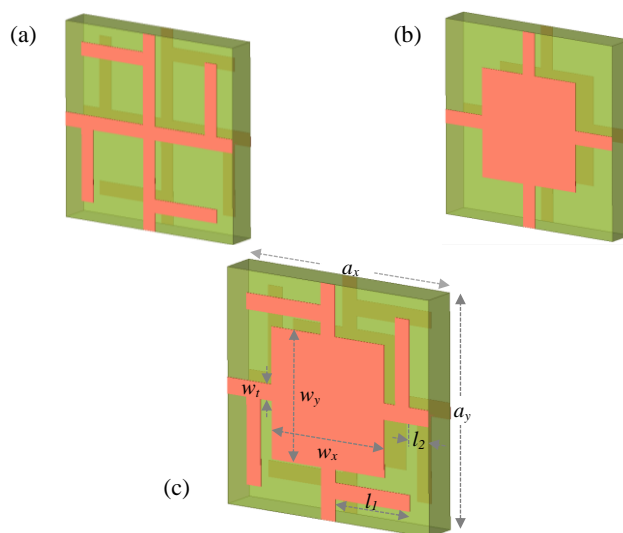


Fig. 1. (a) CCMM [3], (b) estructura fishnet modificada y (c) FCMM propuesta. Dimensiones:  $l_1 = 3.7$  mm,  $l_2 = 0.95$  mm,  $w_t = 0.7$  mm,  $w_x = w_y = 5.6$  mm,  $a_x = a_y = 10$  mm.

### A. Análisis de las estructuras CCMM y fishnet modificada

Antes de analizar la estructura propuesta, se estudian cada una de sus componentes, CMM compuesta y la estructura fishnet, por separado. Fig. 2 y Fig. 3, muestran la variación de los coeficientes de transmisión y el índice de refracción en función de la frecuencia.

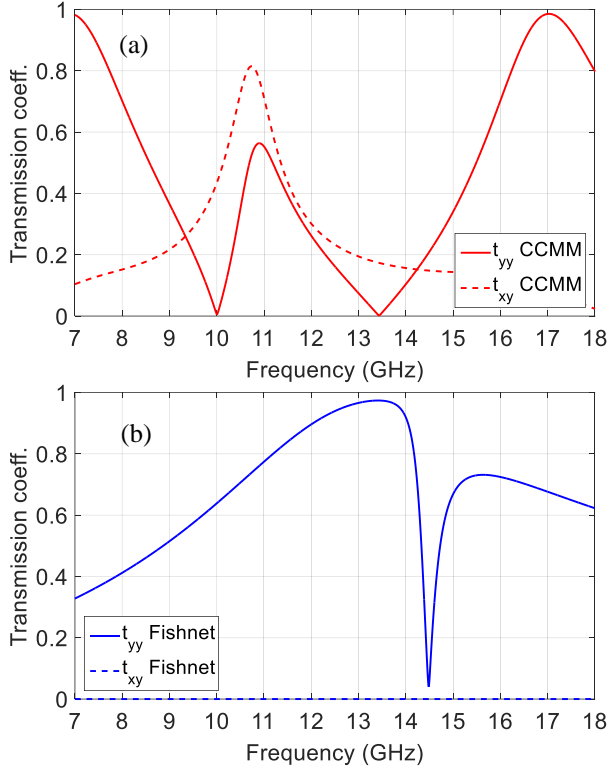


Fig. 2. Coeficientes de transmisión de las estructuras CCMM (a) y la estructura fishnet modificada (b).

En el caso de la estructura CCMM, se aprecian dos gaps en 10 y 13.4 GHz y, dado su carácter quiral, una componente cruzada con un pico de transmisión en 10.8 GHz, Fig. 2a. Esta estructura presenta para cada eigenwave un índice de refracción negativo en una banda de frecuencia situada a partir de las frecuencias de resonancias, Fig. 3a. Sin embargo, dentro de estas bandas con refracción negativa, solo se obtiene parte imaginaria del índice de refracción negativa  $n''_{+} \approx 0$  en la subbanda entre 10.9 y 11.5 GHz. En este ancho de banda, la  $FoM(n_{+})$  máxima es 40.

Por su parte, la estructura tipo fishnet es una estructura no quiral que, al igual que la CCMM, presenta simetría  $C_4$ . Esta estructura presenta una resonancia magnética en 14.5 GHz que produce un gap estrecho en el coeficiente de transmisión cruzada (Fig. 2b), y un pico en el índice de refracción (Fig. 3b).

### B. Análisis de la estructura FCMM

Una vez se han estudiado cada uno de los componentes de manera separada, se analiza la estructura combinada Fig. 1c. Al evaluar la variación de los coeficientes de transmisión frente a la frecuencia, Fig. 4, se puede observar que, para frecuencias inferiores a 14 GHz la transmisión es muy similar a la mostrada

por la estructura CCMM (Fig. 2). Sin embargo, para frecuencias superiores, el comportamiento de los coeficientes de transmisión es muy diferente, presentando la estructura FCMM un comportamiento quiral ausente en la estructura CCMM. Este comportamiento quiral se refleja en la alta transmisión cruzada, con picos en 14.85 y 16.5 GHz. Por su parte, la transmisión co-polar muestra un gap en 15.6 GHz.

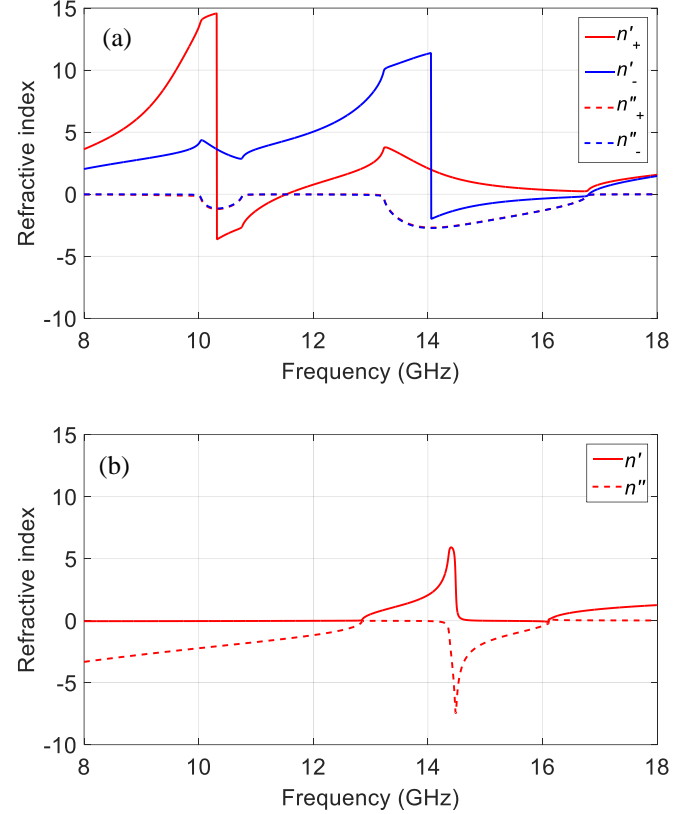


Fig. 3. Índices de refracción de las estructuras (a) CCMM y (b) estructura fishnet modificada.

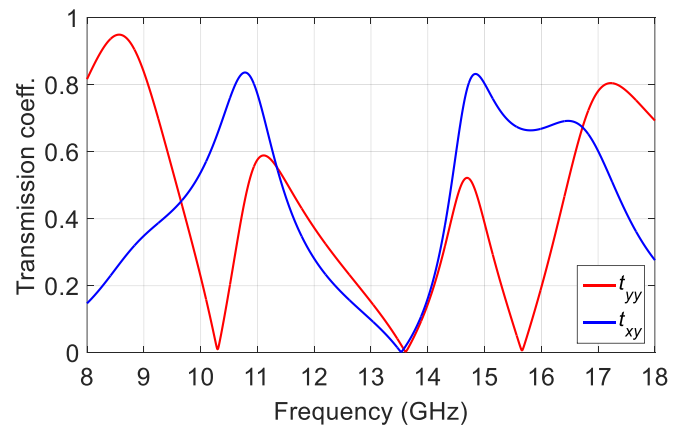


Fig. 4. Coeficientes de transmisión de la estructura FCMM de la Fig. 1c.

Por último, los índices de refracción  $n_{\pm}$  de ambas eigenwaves (Fig. 5) presentan tres resonancias, dos de ellas en el índice  $n_+$ , marcadas en Fig. 5 como A (10.95 GHz) y B (y 13.7 GHz) respectivamente, y una tercera en el índice  $n_-$  en 17.1 GHz,

## REFERENCIAS

- [1] J. B. Pendry, "A chiral route to negative refraction," *Science*, vol. 306, no. 5700, pp. 1353–1355, 2004.
- [2] Z. F. Li, K. B. Alici, H. Caglayan, M. Kafesaki, C. M. Soukoulis, and E. Ozbay, "Composite chiral metamaterials with negative refractive index and high values of the figure of merit," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 6146–6156, 2012.
- [3] O. Fernández, Á. Gómez, A. Vegas, G. J. Molina-Cuberos, and A. J. García-Collado, "Losses reduction in composite chiral metamaterials," *The 36th PIERS in Prague, Czech Republic*, 6-9 July, 2015.
- [4] J. Zhou, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "An efficient way to reduce losses of left-handed metamaterials," *Opt. Express*, vol. 16, pp. 11147–11152, 2008.
- [5] M. Kafesaki, I. Tsiapa, N. Katsarakis, Th. Koschny, C. M. Soukoulis, and E. N. Economou, "Left-handed metamaterials: The fishnet structure and its variations," *Physical Review B*, vol. 75, 235114, 2007.
- [6] R. Zhao, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Chiral metamaterials: retrieval of the effective parameters with and without substrate," *Opt. Express*, vol. 18, no. 14, pp. 14553–14567, 2010.

etiquetada como C. Como se puede comprobar, la parte real del índice de refracción es negativa en una banda de frecuencia situada a continuación de la frecuencia de resonancia. Los anchos de banda (BW) con  $n'_+ < 0$  ubicados a junto a las resonancias A y B son:  $BW_A = 0.9$  GHz y  $BW_B = 1.8$  GHz mientras que después de la resonancia C se observa un ancho de banda  $BW_C = 0.8$  GHz con  $n'_- < 0$ .

A pesar de presentar  $n'_+ < 0$  en 1.8 GHz ( $BW_B$ ), dicha banda solo dispone de una estrecha región, entre 14.7 y 15.3GHz, con bajas pérdidas, *i.e.*,  $n''_+$  próximo a cero. En esta banda, el  $FoM(n_+)$  máximo es de únicamente 22. Sin embargo, en las otras dos bandas,  $BW_A$  y  $BW_C$ ,  $|n''_{\pm}|$  es próximo a 0 en toda la banda, incluso en la proximidad de las resonancias. Con estos valores,  $FoM(n_{\pm})$  es alta, superior a 50 en más del 60% de cada banda de frecuencia. Por tanto, estas dos bandas de frecuencia, debido a sus menores pérdidas, son más recomendables que  $BW_B$  para desarrollar dispositivos que hagan uso de la refracción negativa.

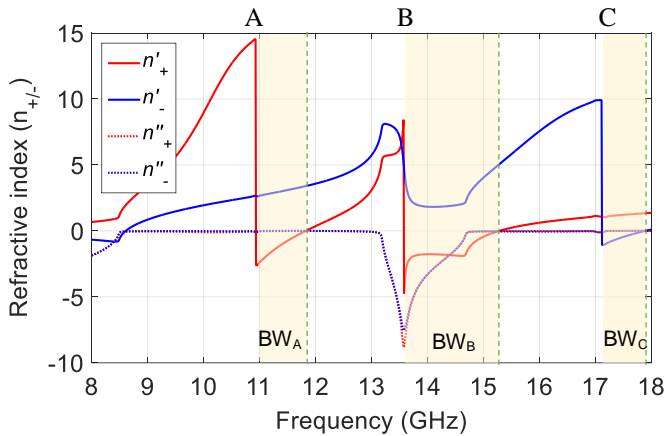


Fig. 5. Índices de refracción de la estructura metamaterial quiral tipo fishnet.

## III. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado y analizado una nueva estructura quiral desarrollada para conseguir índice de refracción negativo y bajas pérdidas. Esta estructura combina dos estructuras de bajas pérdidas, una estructura metamaterial quiral compuesta y una estructura fishnet modificada. Esta combinación mejora las características de las estructuras individuales, en particular del CCMM.

Esta nueva estructura metamaterial quiral muestra índices de refracción negativos en tres bandas frecuenciales. Dos de estas bandas presentan bajas pérdidas y  $FoM(n_{\pm})$  mayor de 50 en un ancho de banda superior a 0.5 GHz en cada banda.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España a través de los proyectos de investigación TEC2014-55463-C3-1-P y TEC2014-55463-C3-3-P.