

# Barrido del haz en antena de onda de fuga basada en metasuperficie mediante cristales líquidos

Elena Abdo Sánchez<sup>(1)</sup>, Ariel Epstein<sup>(2)</sup>, and George V. Eleftheriades<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Instituto Universitario de Investigación en Telecomunicación, E.T.S.I.T., Universidad de Málaga, Andalucía Tech, España.

<sup>(2)</sup>Andrew and Erna Viterbi Faculty of Electrical Engineering, Technion - Israel Institute of Technology, Haifa, Israel.

<sup>(3)</sup>The Edward S. Rogers Sr. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada.

**Abstract**—In this communication, the reconfigurability mechanisms for beam steering at a fixed frequency in a leaky-wave antenna based on Huygens metasurfaces are reviewed. A preliminary design for a forward-to-backward scanning antenna at 24 GHz is proposed based on the use of a commercial liquid crystal ( $\epsilon_r$  ranging from 2.46 to 3.54). The simulation results show that the beam steers when the permittivity of the liquid crystal (partially filling the waveguide, with a 560  $\mu\text{m}$  high layer) is reconfigured. It is shown that the antenna can meet the challenges of this technology (a very thin layer of liquid crystal and a not very wide range of permittivity) while obtaining scanning from  $-15$  to  $15^\circ$  maintaining the directivity around 17 dBi, including broadside.

## I. INTRODUCCIÓN

Las metasuperficies surgieron como la versión bidimensional de los metamateriales con el objetivo de simplificar su implementación. En los últimos años, ha habido una intensa investigación en este ámbito, porque han demostrado ser herramientas muy potentes para tener control sobre las transformaciones de campo electromagnético. Específicamente, las metasuperficies de Huygens, consistentes en celdas basadas en dipolos magnéticos y eléctricos ortogonales, han tenido un auge importante porque han permitido una manipulación de las ondas electromagnéticas sin precedentes [1].

Una de las aplicaciones de las metasuperficies se ha focalizado en los sistemas radiantes. En concreto, se han empleado metasuperficies de Huygens para el control de la radiación de antenas de ondas de fuga (en inglés, *leaky wave*). Los autores han demostrado en [2] que se puede diseñar una antena de onda de fuga con control arbitrario de los parámetros de radiación (tasa de fuga y ángulo de apuntamiento) utilizando metasuperficies de Huygens bianisótropas (BHMSs). En concreto, se trata de una guía de placas paralelas, cuya capa de arriba se sustituye por una BHMS cuyo diseño permite tener control arbitrario sobre estos parámetros.

A pesar de las capacidades de control de radiación de las antenas de ondas de fuga basada en BHMS, su uso en aplicaciones emergentes requiere de dotarles de reconfiguración de haz. Estas antenas, frente a los ampliamente utilizados *phased arrays*, poseen la importante ventaja de poseer una red de alimentación extremadamente sencilla (se trata de alimentar una guía).

La reconfiguración electrónica del haz es clave para aplicaciones como 5G o los radares de automoción. Para conseguir dicha capacidad, se deben sintonizar, o bien, los elementos que forman la antena (la metasuperficie) o el material sobre el que se construye la antena. Los cristales líquidos están recibiendo mucha atención por su capacidad de reconfigurar

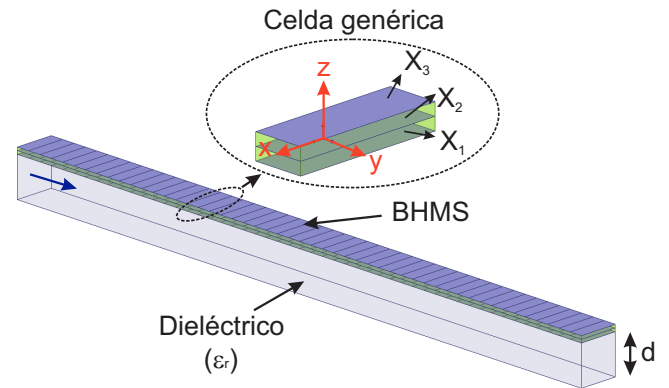


Fig. 1: Dibujo de la antena de onda de fuga propuesta.

su permitividad eléctrica a través de una tensión de polarización. No obstante, diseñar una antena reconfigurable para ser implementada con cristales líquidos presenta varios retos (además de los tecnológicos), como los espesores disponibles de las capas de cristales líquidos (del orden de centenares de micras) y el rango de variación de su permitividad.

En esta comunicación, se exponen los mecanismos de reconfiguración del haz a frecuencia fija en antenas de ondas de fuga basada en metasuperficie de Huygens y se presenta un diseño preliminar de antena con barrido del haz para ser implementado con cristal líquido.

## II. CONCEPTO Y GEOMETRÍA DE LA ANTENA

La antena está basada en una guía de placas paralelas rellena de un determinado dieléctrico (puede ser aire) en la que la placa superior se reemplaza por una BHMS para permitir la radiación. Se trabaja con campo eléctrico transversal (TE), por lo que, a todos los efectos, la guía de placas paralelas se puede implementar mediante una guía rectangular. Las características de la onda de fuga generada se determinan mediante el diseño de la BHMS. Ésta se compone de celdas de tamaño mucho menor que la longitud de onda que se pueden implementar de distintas maneras. Se ha demostrado que se puede conseguir una celda de metasuperficie de Huygens mediante tres superficies de reactancia apiladas. Su implementación, compatible con tecnología PCB, puede constar sencillamente de láminas de cobre impreso con la forma geométrica necesaria que implemente la reactancia a sintetizar separadas por capas de dieléctrico [2]–[5]. En la Fig. 1 se muestra un dibujo de la geometría de la antena.

Para conseguir transformar el campo dentro de la guía en la onda de fuga deseada, se plantean las ecuaciones de los

campos arriba ( $E_x^+$  and  $H_y^+$ ) y debajo ( $E_x^-$  and  $H_y^-$ ) de la BHMS como:

$$E_x^- = 2j|E_{in}| \sin(k_z^-(z+d))e^{-jk_y^-y} \quad (1a)$$

$$H_y^- = -2|E_{in}| \frac{k_z^-}{k^- \eta^-} \cos(k_z^-(z+d))e^{-jk_y^-y} \quad (1b)$$

y

$$E_x^+ = |E_{out}| e^{-jk_z^+z} e^{-jk_y^+y} e^{j\xi} \quad (2a)$$

$$H_y^+ = |E_{out}| \frac{k_z^+}{k^+ \eta^+} e^{-jk_z^+z} e^{-jk_y^+y} e^{j\xi}, \quad (2b)$$

donde  $\xi$  es una constante de cambio de fase que puede añadirse como grado de libertad y las constantes de propagación son complejas:  $k_z = \beta_z - j\alpha_z$  y  $k_y = \beta - j\alpha$ , donde  $\alpha$  es el factor de fuga de la antena.  $\eta^+$  y  $\eta^-$  representan las impedancias de onda en el medio arriba y debajo de la superficie, respectivamente. Nótese que se garantiza la condición de conservación de potencia local a través de la superficie. De este modo, la metasuperficie que implementa esa transformación va a resultar sin pérdidas y pasiva [6].

Una vez fijados los valores de los campos arriba y debajo de la metasuperficie, los parámetros de la metasuperficie  $\{Z_{se}, Y_{sh}, K_{em}\}$  se pueden obtener mediante las condiciones de transición de superficies bianisótropas [2], [6], donde  $Z_{se}$  representa la impedancia de superficie eléctrica,  $Y_{sm}$  la admitancia de superficie magnética y  $K_{em}$  el coeficiente de acoplamiento magnetoeléctrico. Es importante destacar que la superficie resultante es periódica y que el campo radiado se corresponde con el primer armónico de Floquet.

Finalmente, se pueden transformar los constituyentes de la metasuperficie  $\{Z_{se}, Y_{sh}, K_{em}\}$  en tres admitancias apiladas mediante dieléctrico  $\{X_1, X_2, X_3\}$ .

En resumen, la derivación teórica muestra en [2] que se puede transformar el modo guiado en un único modo radiante de fuga mediante una BHMS periódica con control arbitrario de la dirección de apuntamiento ( $\theta_{out}$ ), la tasa de fuga ( $\alpha$ ), el periodo de la BHMS ( $p$ ) y los parámetros de la guía ( $d$  y  $\epsilon_r$ ).

### III. RECONFIGURACIÓN DEL HAZ DE APUNTAMIENTO

En el tipo de antena propuesto, existen diferentes mecanismos de reconfiguración del ángulo de apuntamiento a frecuencia fija que se pueden predecir con expresiones muy simples [7]. Más sencillo que reconfigurar la metasuperficie en sí (para lo que se necesitaría reconfigurar celda a celda), podemos reconfigurar algún parámetro de la guía de ondas (la altura o la permitividad del sustrato) de manera que modifiquemos el campo que se propaga dentro de la guía  $\{E_x^-, H_y^-\}$ . De esta forma, puesto que la metasuperficie no se modifica, el campo encima de la misma cambiará. Dado que la metasuperficie impone la condición de contorno necesaria para la cual se ha diseñado, al modificar el campo en la guía podemos generar un campo radiado que no mantenga la condición de ser un único modo de fuga (se pueden radiar más armónicos de Floquet), y, por tanto, el diagrama de radiación no consista en un único haz y se deteriore.

Si asumimos que el efecto que produce la BHMS se puede modelar como un coeficiente de reflexión efectivo constante, denominado  $\Gamma = Re^{j\phi}$ , la condición de resonancia transversal

(que fuerza que el campo transmitido y reflejado dentro de la guía se sumen en fase) consiste en la siguiente expresión:

$$2k^-d \cos(\theta_{in}) + \phi = 2\pi, \quad (3)$$

donde  $\theta_{in}$  es el ángulo de propagación dentro de la guía, que cumple con  $\beta^- \approx k^- \sin(\theta_{in})$ .

Por tanto, es fácil comprobar que si la altura de la guía,  $d$ , cambia, entonces variará el ángulo  $\theta_{in}$  para que se siga cumpliendo la condición (3). Lo mismo ocurre si lo que se modifica es la permitividad del dieléctrico que rellena la guía,  $\epsilon_r$ , puesto que  $k^- = k_0 \sqrt{\epsilon_r}$ . Si se asume que, tal como ocurre en el caso estático, va a radiar el armónico de Floquet  $n = 1$ , entonces la periodicidad de la BHMS nos va a permitir predecir el ángulo de apuntamiento, ya que

$$p = \frac{2\pi}{|\beta^+ - \beta^-|} \quad (4)$$

lo que se traduce en

$$|\sin \theta_{out} - \sqrt{\epsilon_r} \sin \theta_{in}| = \frac{2\pi}{pk_0}. \quad (5)$$

De esta forma, se pueden obtener expresiones muy sencillas que predicen de manera bastante precisa el cambio del haz de apuntamiento con la  $d$  o la  $\epsilon_r$ . En [7] se demuestra que la suposición de que se mantenga solo un armónico de Floquet radiando es acertada porque se mantiene un único haz que escanea cuando se reconfigura uno de los dos parámetros de la guía. Además, es importante señalar que dada la libertad en la elección de los parámetros de diseño que se pueden escoger (periodo, ángulo  $\theta_{in}$  inicial, etc.), se puede controlar la tasa de barrido (esto es, la sensibilidad del barrido con respecto al parámetro reconfigurable) y el rango de apuntamiento.

### IV. DISEÑO DE ANTENA RECONFIGURABLE PARA IMPLEMENTAR CON CRISTALES LÍQUIDOS

En esta sección, se va a realizar un diseño preliminar de la antena capaz de hacer un barrido a frecuencia fija cuando se reconfigura la permitividad del dieléctrico de la guía utilizando un cristal líquido comercial. El objetivo es estudiar la viabilidad de hacer la reconfiguración con esta tecnología.

Si el dieléctrico de la guía es homogéneo con una  $\epsilon_r$  para la cual se ha hecho el diseño de la BHMS, se puede predecir el ángulo de apuntamiento cuando se reconfigura la permitividad ( $\epsilon_r'$ ) con la siguiente expresión [7]:

$$\theta'_{out} = \text{asin} \left( \pm \frac{2\pi}{pk_0} + \sqrt{\epsilon_r' - \epsilon_r \cos^2 \theta_{in}} \right) \quad (6)$$

donde  $p$  es el periodo de la metasuperficie y  $\theta_{in}$  el ángulo de incidencia dentro de la guía para el cual se ha hecho el diseño. Nótese que la variación del apuntamiento con la permitividad no depende de la altura de la guía escogida para el diseño,  $d$ . La Fig. 2 muestra un ejemplo de la variación del ángulo de apuntamiento  $\theta'_{out}$  con un barrido de la permitividad para un diseño de BHMS de periodo  $p = 1.5\lambda_0$ ,  $\epsilon_r = 2.9$  y distintos  $\theta_{in}$ . Se observa que la elección de  $\theta_{in}$  para el diseño es importante para que el apuntamiento varíe en el rango de  $\epsilon_r'$  necesario (a mayor  $\theta_{in}$  las curvas se desplazan más arriba en  $\epsilon_r'$ , pero la forma de la curva se mantiene). Por otro lado, la Fig. 3 muestra la influencia del periodo en la variación del apuntamiento con la permitividad. Como se puede observar, a

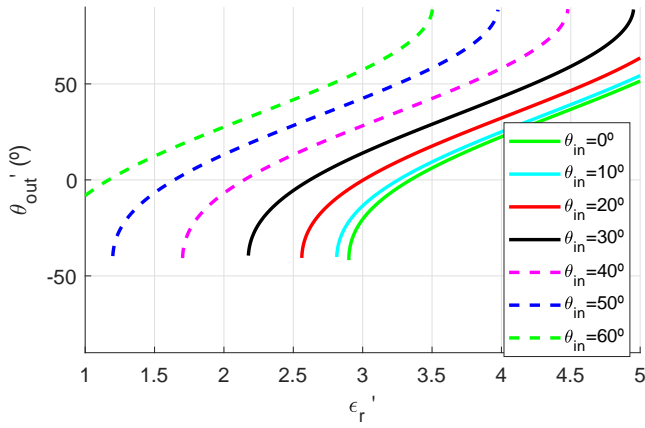


Fig. 2: Variación del ángulo de apuntamiento con la permitividad del sustrato de la guía,  $\epsilon_r'$ , para una BHMS diseñada con  $p = 1.5\lambda_0$ ,  $\epsilon_r = 2.9$  y distintos  $\theta_{in}$ .

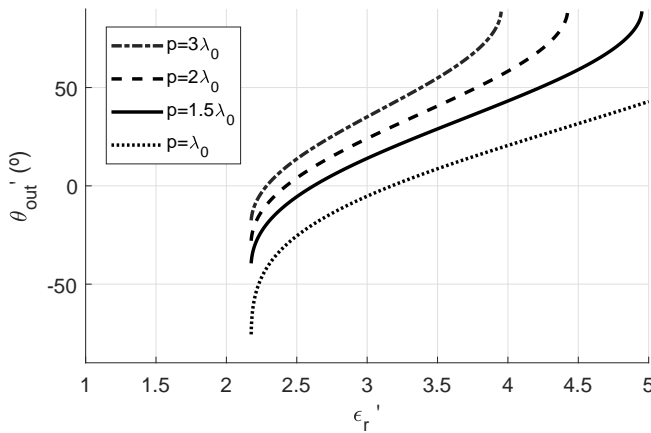


Fig. 3: Variación del ángulo de apuntamiento con la permitividad del sustrato de la guía,  $\epsilon_r'$ , para una BHMS diseñada para  $\theta_{in} = 30^\circ$ ,  $\epsilon_r = 2.9$  y distintos periodos.

mayor periodo, la variación es más rápida pero se consiguen ángulos de apuntamiento más altos.

Para el diseño, se ha elegido la frecuencia de 24 GHz por su aplicación en los radares de automoción y un cristal líquido comercial de la empresa Merck KGaA con una mayor variación de la permitividad a frecuencias de microondas. Los datos proporcionados a 19 GHz muestran que la permitividad puede variar entre 2.46 ( $\epsilon_{\perp}$ ) y 3.54 ( $\epsilon_{\parallel}$ ) [8], rango que ha sido el empleado para el diseño.

Otra característica limitante que se ha tenido en cuenta es que, típicamente, la capa de cristal líquido debe tener una altura extremadamente reducida, del orden de centenas de micras. Esto supone hacer una guía de onda con una altura mucho menor que la longitud de onda (que es de 12.5 mm en el vacío a 24 GHz). Cabe mencionar que esto es posible gracias a la elección arbitraria de la altura de la guía en esta antena, que puede incluso ser mucho menor que la mínima necesaria para que una guía tradicional no esté al corte.

Teniendo en cuenta lo anterior, se ha realizado un diseño de la antena para que sea capaz de hacer un barrido de atrás hacia adelante cuando la permitividad varía entre 2.46 y 3.54. Para que el diseño sea más realista, hay que tener en cuenta que si

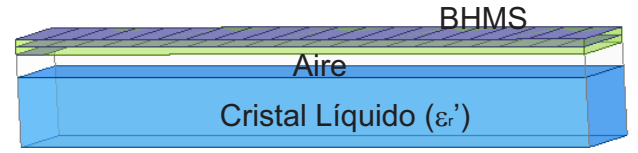


Fig. 4: Esquemático de la antena propuesta para reconfigurar el haz empleando cristal líquido.

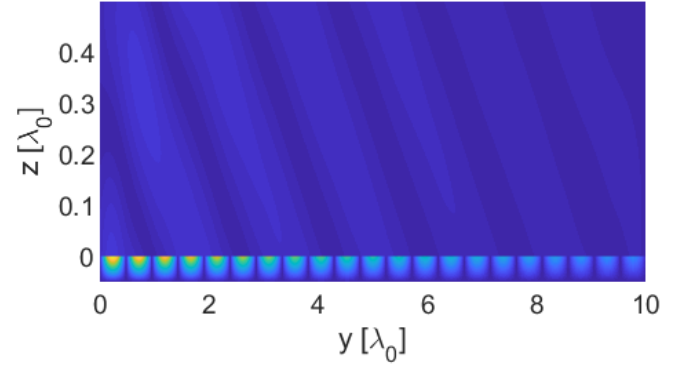


Fig. 5: Distribución de campo teórico para la antena diseñada si el dieléctrico fuese homogéneo con  $\epsilon_r = 2.9$ . Nótese que las escalas de los dos ejes son distintas para facilitar la visualización.

el dieléctrico justo debajo de la metasuperficie cambia, van a verse modificadas las características de la misma, lo que va a suponer un problema práctico para obtener el comportamiento deseado. Por ello, se ha optado por rellenar parcialmente la guía con el cristal líquido, dejando una porción justo encima del mismo de aire que está debajo de la BHMS, de manera que ésta no vea modificadas sus características con la reconfiguración.

El esquema de la estructura diseñada se muestra en la Fig. 4 (téngase en cuenta que no está a escala). La altura total de la guía se ha fijado a  $0.05\lambda_0$  que son unas 625 micras. Con cristal líquido se ha rellenado el 90% de la misma, lo que supone una capa de cristal líquido de aproximadamente 560 micras. Hay que tener en cuenta que el hecho de que la guía esté parcialmente rellena de dieléctrico hace que las expresiones obtenidas para el caso de dieléctrico homogéneo no sean válidas. No obstante, partiendo de esas expresiones y realizando distintas simulaciones, se ha llegado a un diseño que cumple con las especificaciones. Así, para el diseño de la BHMS se ha escogido una permitividad relativa de la guía de 2.9, un periodo de  $p = \frac{8}{6}\lambda_0$  y un ángulo  $\theta_{in} = 38^\circ$ . Para este diseño, si el dieléctrico fuese homogéneo, la distribución de campo teórico que se obtendría sería la representada en la Fig. 5, que implica un ángulo de apuntamiento de  $17^\circ$ . La longitud de la metasuperficie es de  $10\lambda_0$  y se ha escogido un factor de fuga  $\alpha = 0.02k_0$ , lo que supone radiar aproximadamente el 90% de la potencia.

Para implementar la metasuperficie en el simulador electromagnético (HFSS) se han empleado condiciones de contorno de impedancia, que emulan las reactancias necesarias en cada una de las tres capas de la Fig. 1, separadas de dieléctrico RO3010 con una permitividad relativa de 12.9 y un grosor de

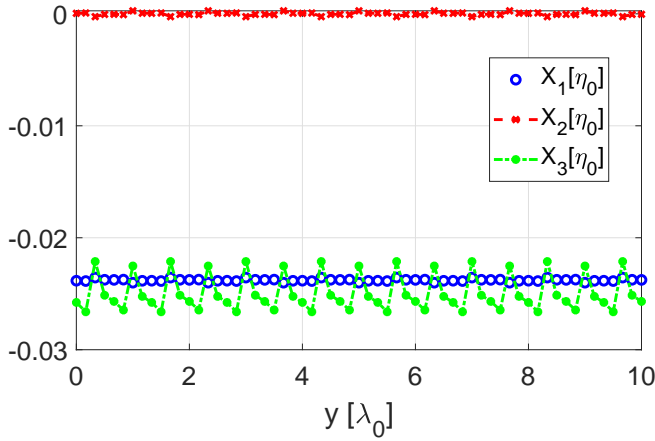


Fig. 6: Reactancias resultantes a implementar para construir la metasuperficie ( $X_1$  se corresponde con la admitancia inferior y  $X_3$  con la superior, de acuerdo al dibujo de la Fig. 1).

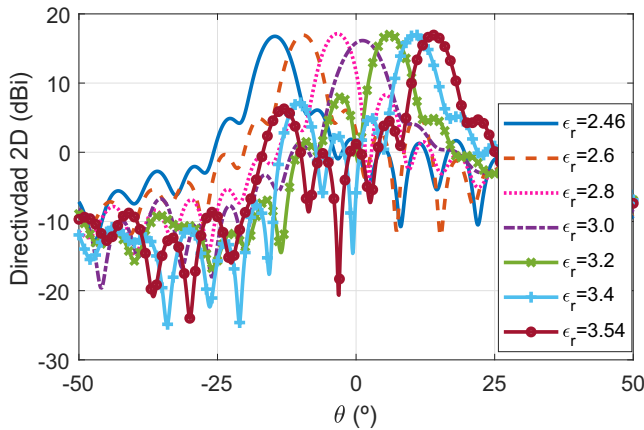


Fig. 7: Diagramas de directividad 2D simulados para el rango de permitividad relativa del cristal líquido.

50.8 micras (2 milésimas de pulgadas). Se ha empleado una longitud de celda de  $\lambda_0/6$ , por lo que resultan 8 celdas por periodo. Las reactancias resultantes se muestran en la Fig. 6.

Finalmente se presentan los resultados simulados de radiación. La Fig. 7 muestra los diagramas de directividad para los distintos valores de  $\epsilon'_r$  dentro del margen proporcionado por el cristal líquido de Merck. Se observa cómo se obtiene un único lóbulo principal a pesar de reconfigurar la permitividad (y, por tanto, el campo dentro de la guía) para la cual estaba diseñada la BHMS. Se obtiene muy buen nivel de lóbulo principal a secundario y un barrido de atrás hacia adelante pasando por broadside. Esto se puede apreciar mejor en la Fig. 8 donde se muestra (eje de la izquierda) el máximo de la directividad obtenido y (eje de la derecha) el ángulo de apuntamiento para el rango de permitividad relativa estudiado. Se observa cómo el nivel de directividad se mantiene alrededor de 17 dBi para todo el margen y el haz escanea desde aproximadamente  $-15^\circ$  a  $+15^\circ$ .

## V. CONCLUSIONES

Se ha realizado un diseño preliminar de antena de onda de fuga basada en metasuperficie de Huygens bianisotropa con

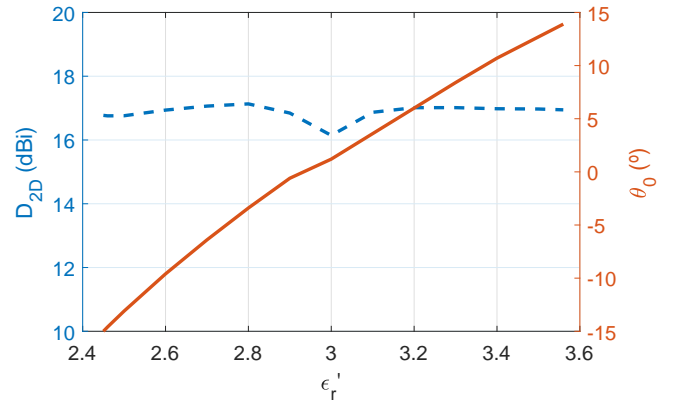


Fig. 8: Directividad y ángulo de apuntamiento simulados para el rango de permitividad relativa del cristal líquido.

capacidad de reconfiguración del haz de apuntamiento mediante la variación de la permitividad del sustrato que rellena la guía de ondas. Se ha escogido el rango de variación de la permitividad de un cristal líquido comercial, demostrando que se puede obtener un barrido de atrás hacia adelante de al menos  $30^\circ$  con directividad aproximadamente constante y una capa de cristal líquido de espesor de centenares de micras. El trabajo futuro consistirá en implementar las reactancias de la metasuperficie con láminas de cobre impreso apiladas y demostrar experimentalmente el concepto.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIU) (Contrato Juan de la Cierva-Incorporación) bajo el contrato IJC2018-038440-I y por el MCIU/AEI/FEDER (Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad) bajo el proyecto RTI2018-097098-J-I00.

## REFERENCIAS

- [1] C. Pfeiffer and A. Grbic, "Metamaterial Huygens surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, no. 19, pp. 197401, May 2013.
- [2] E. Abdo-Sánchez, M. Chen, A. Epstein and G. V. Eleftheriades, "A Leaky-Wave Antenna With Controlled Radiation Using a Bianisotropic Huygens' Metasurface," in *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 1, pp. 108–120, Jan. 2019.
- [3] C. Pfeiffer and A. Grbic, "Bianisotropic metasurfaces for optimal polarization control: analysis and synthesis," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 2, no. 4, 04001, 2014.
- [4] M. Chen, E. Abdo-Sánchez, A. Epstein, and G. V. Eleftheriades, "Theory, design, and experimental verification of a reflectionless bianisotropic Huygens' metasurface for wide-angle refraction," *Phys. Rev. B*, vol. 97, 125433, 2018.
- [5] G. Lavigne, K. Achouri, V. S. Asadchy, S. A. Tretyakov, and C. Caloz, "Susceptibility Derivation and Experimental Demonstration of Refracting Metasurfaces Without Spurious Diffraction," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 3, pp. 1321–1330, Mar. 2018.
- [6] A. Epstein and G. V. Eleftheriades, "Arbitrary power-conserving field transformations with passive lossless Omega-type bianisotropic metasurfaces," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 9, pp. 3880–3895, Sept. 2016.
- [7] E. Abdo-Sánchez, A. Epstein and G. V. Eleftheriades, "Reconfigurability Mechanisms With Scanning Rate Control for Omega-Bianisotropic Huygens' Metasurface Leaky-Wave Antennas," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 168247–168260, 2019.
- [8] C. Fritzsche and M. Wittek, "Recent developments in liquid crystals for microwave applications," *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, CA, 2017, pp. 1217–1218.