

Implementación de antena leaky-wave basada en metasuperficie de Huygens

Elena Abdo-Sánchez⁽¹⁾, Ariel Epstein⁽²⁾, George V. Eleftheriades⁽³⁾
 elenaabdo@ic.uma.es, epsteina@ee.technion.ac.il, gelefth@ece.utoronto.ca

⁽¹⁾Dpto. Ing. Comunicaciones, E.T.S.I. Telecomunicación, Universidad de Málaga, Andalucía Tech, E-29071 Málaga, Spain.

⁽²⁾Andrew and Erna Viterbi Faculty of Electrical Engineering, Technion - Israel Institute of Technology, Haifa 32000, Israel.

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

Resumen—In this communication, the implementation of a leaky-wave antenna based on bianisotropic Huygens' metasurface is addressed. It consists of a parallel-plate waveguide in which the top plate is replaced by a metasurface. It was previously shown that, by properly designing the metasurface, arbitrary control on the radiation parameters of the leaky mode can be achieved. Closed-form expressions allow getting the constitutive parameters of the required metasurface. However, achieving a physical realization entails several challenges, discussed in this contribution.

I. INTRODUCCIÓN

Del mismo modo que los metamateriales son materiales diseñados a nivel microscópico para conseguir unas propiedades electromagnéticas diferentes a los materiales convencionales, las metasuperficies son superficies no homogéneas diseñadas de tal forma que consiguen transformaciones de campo electromagnético determinadas. Concretamente, las metasuperficies de Huygens consisten en partículas más pequeñas que la longitud de onda que son polarizables eléctrica y magnéticamente y se diseñan para hacer cumplir unas condiciones de contorno deseadas. La transformación determina qué características deben presentar dichas partículas. Recientemente, se ha demostrado que se puede conseguir una transformación de campo arbitraria usando partículas pasivas y sin pérdidas, siempre que se cumpla la condición de conservación local de potencia a lo largo de la metasuperficie [1]. Esto se logra introduciendo bianisotropía del tipo omega en los 'meta-átomos' que conforman la metasuperficie, ya que esta característica permite disponer de un grado de libertad adicional (el acoplamiento magneto-eléctrico).

En [2], se presentó la aplicación de metasuperficies de Huygens bianisótropas del tipo omega (O-BMS) al diseño de una antena *leaky-wave* con elección arbitraria de sus parámetros. Este tipo de antena se basa en estructuras guiadas de las que se escapa potencia en forma de radiación a medida que la onda viaja por la guía de transmisión. La estructura propuesta consistía en una guía de placas paralelas cuya cara superior se sustituyó por una metasuperficie, de forma que su diseño permitiese controlar el ángulo de apuntamiento y el factor de fuga de la onda (*leakage factor*). Se estableció una metodología de diseño, con fórmulas cerradas, para el cálculo de los parámetros de la metasuperficie (la impedancia de superficie eléctrica, admitancia de superficie magnética y coeficiente de acoplamiento magnetoeléctrico). Esta parte del diseño se denomina 'diseño macroscópico', del cual se obtienen los parámetros continuos de una superficie



Fig. 1. Esquemático de la estructura de antena propuesta.

de anchura cero (modelo ideal de la superficie) para una determinada transformación de campo electromagnético. Sin embargo, la realización física de dicha estructura conlleva el 'diseño microscópico' de la superficie (a nivel de meta-átomo), que consiste en encontrar una realización física de la metasuperficie que presente los parámetros obtenidos en la etapa de diseño macroscópico. En esta comunicación, se abordan aspectos de la implementación física de una metasuperficie de Huygens bianisótropa para el diseño de una antena leaky-wave con flexibilidad en la radiación (elección del ángulo de apuntamiento y del factor de fuga de forma independiente).

II. CONCEPTO

La estructura propuesta consiste en una guía de placas paralelas en la que la tapa superior se reemplaza por una O-BMS (en $z = 0$), como se ilustra en la Fig. 1. El problema se considera 2D ($\partial/\partial x = 0$) por simplicidad. La estructura se excita con un campo transversal eléctrico (TE) en $y = 0$. Las componentes del campo encima (E_x^+ y H_y^+) y debajo (E_x^- y H_y^-) de la metasuperficie se relacionan a través de las condiciones de transición de superficie bianisótropa [3]. De ahí, se pueden obtener los parámetros de la metasuperficie, una vez que se definan los campos arriba y abajo de la superficie [1], [2]:

$$\begin{aligned} Z_{se} &= -j \left(\frac{1}{2} \text{Im} \left[\frac{E_x^+ + E_x^-}{H_y^+ - H_y^-} \right] + K_{em} \text{Im} \left[\frac{E_x^+ - E_x^-}{H_y^+ - H_y^-} \right] \right) \\ Y_{sm} &= -j \left(\frac{1}{2} \text{Im} \left[\frac{H_y^+ + H_y^-}{E_x^+ - E_x^-} \right] - K_{em} \text{Im} \left[\frac{H_y^+ - H_y^-}{E_x^+ - E_x^-} \right] \right) \\ K_{em} &= \frac{1}{2} \frac{\text{Re}[E_x^+ H_y^- - E_x^- H_y^{+*}]}{\text{Re}[(E_x^+ - E_x^-)(H_y^+ - H_y^-)^*]} \end{aligned} \quad (1)$$

con Z_{se} la impedancia de superficie eléctrica, Y_{sm} la admitancia de superficie magnética y K_{em} el coeficiente de acoplamiento magnetoeléctrico.

III. REALIZACIÓN FÍSICA

Una vez se determinen los campos de acuerdo con las características de radiación deseadas, se obtienen, siguiendo

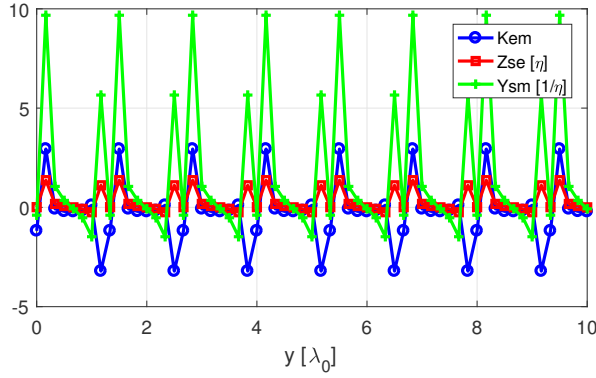


Fig. 2. Ejemplo de los parámetros constitutivos de la metasuperficie discretizados.

(1), los parámetros constitutivos continuos de la metasuperficie $\{K_{em}, Y_{sm}, Z_{se}\}$ a implementar. Para su realización con partículas discretas, primero es necesario muestrear los parámetros a lo largo de y . La Fig. 2 ilustra un ejemplo de los parámetros a sintetizar para una metasuperficie de longitud $10\lambda_0$ y factor leakage (α) constante e igual a $0,02k_0$, donde k_0 es la constante de propagación en el vacío, y un ángulo de apuntamiento broadside. En este caso se ha escogido una longitud de celda de $\lambda_0/6$. Como se puede observar, la metasuperficie resultante es periódica, dado que α es constante.

La siguiente etapa consiste en sintetizar cada una de las celdas (meta-átomos) para que se comporte con los parámetros de la metasuperficie deseados. Para ello, se puede analizar cada celda como un bipuerto en el que las tensiones y corrientes de los puertos 1 y 2 se relacionan con los campos eléctrico y magnético debajo y encima de la metasuperficie, respectivamente. Así, las componentes tangenciales de los campos se pueden relacionar con la matriz impedancia del bipuerto como sigue:

$$\begin{pmatrix} E_x^- \\ E_x^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_y^- \\ -H_y^+ \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Utilizando las condiciones de transición de superficie bianisótropa, se puede relacionar la matriz impedancia de cada celda con los parámetros constitutivos de la metasuperficie. Para metasuperficies bianisótropas, la matriz admitancia no será simétrica y habrá tres parámetros distintos. Por tanto, se necesitan tres grados de libertad para construir las celdas.

Una forma de implementar la matriz impedancia de cada celda consiste en utilizar tres admitancias separadas por sustrato dieléctrico, tal como se ilustra en la Fig. 3. Puesto que la derivación teórica garantiza celdas pasivas y sin pérdidas, las admitancias resultantes tendrán sólo parte imaginaria. Se pueden encontrar expresiones cerradas para calcular el valor de las reactancias X_{inf} , X_{med} y X_{sup} [1]. Un ejemplo de estos valores se muestra en la Fig. 4. Este circuito equivalente para las celdas permite realizar simulaciones idealizadas en ANSYS HFSS utilizando condiciones de contorno de impedancia con los valores obtenidos del diseño teórico, tal como se hizo en [2]. No obstante, para la implementación física se ha de encontrar una estructura geométrica que permita obtener los valores de admitancia deseados. Para ello, se puede utilizar

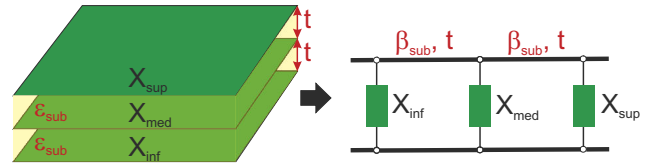


Fig. 3. Implementación de una celda utilizando tres láminas de impedancia separadas por dieléctrico.

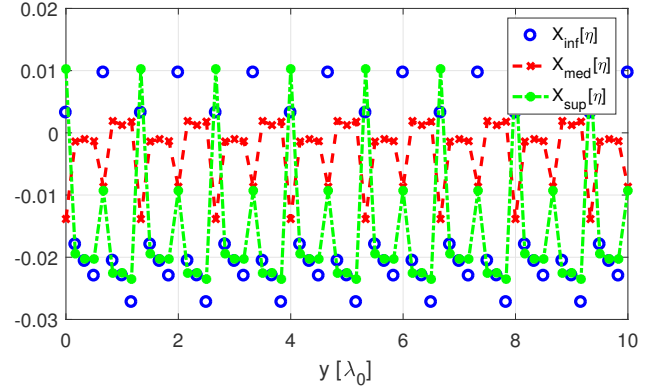


Fig. 4. Ejemplo de las reactancias a sintetizar de acuerdo con la implementación de la Fig. 3, utilizando un sustrato de $\epsilon_{sub}=12.94$ y $t=2$ mil.

cualquier elemento resonante que tenga un comportamiento inductivo-capacitivo. En este caso, hemos utilizado stubs impresos en forma de huesos. Variando la longitud del hueso se consigue sintetizar valores desde capacitivos a inductivos. Para extraer la variación de la admitancia del hueso con respecto a su longitud se realiza una simulación de cada capa, rodeada de los dos dieléctricos correspondientes y asumiendo periodicidad infinita [4].

Un problema importante a la hora de implementar la metasuperficie son las pérdidas. Aunque, idealmente, las celdas requeridas son pasivas y sin pérdidas, cualquier realización física de las admitancias tendrá pérdidas que harán imposible sintetizar la matriz Z deseada. Por ese motivo, se ha optado por introducir una capa más con otro hueso impreso para disponer de un grado de libertad adicional a la hora de sintetizar la matriz Z . La Fig. 5 ilustra la implementación física elegida de la celda. Para poder realizar el diseño, se ha empleado el modelo en línea de transmisión para obtener numéricamente la matriz de parámetros S de todas las combinaciones geométricas de la celda de la Fig. 5. Para poder emplear este modelo, es necesario minimizar el acoplamiento entre los huesos y con este fin se ha elegido un espesor de sustrato alto ($t = 50$ mil). Finalmente, se selecciona la geometría que minimiza la diferencia en los parámetros S dando prioridad a la fase.

La dificultad de conseguir una implementación física de una metasuperficie con el comportamiento esperado radica en el conjunto de aproximaciones y suposiciones que han de hacerse para posibilitar el diseño. Como se ha mencionado, el modelo de línea de transmisión sólo es válido cuando no hay acoplamiento. Eso hace que se deseen sustratos más gruesos, lo que lleva a superficies no tan delgadas que se alejan de la teórica de espesor nulo. Por otro lado, las pérdidas son importantes en este tipo de aplicación en la que, a diferencia

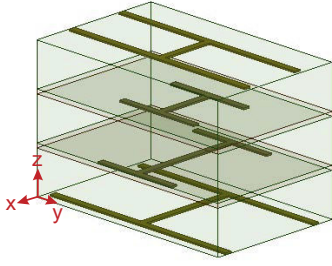


Fig. 5. Implementación física de una celda.

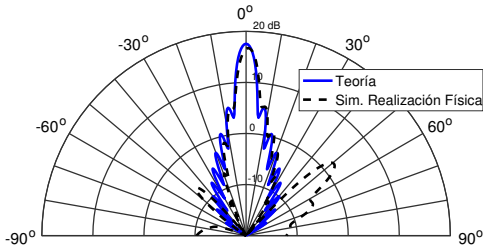


Fig. 6. Comparación de la directividad 2D del diseño teórico frente a la simulación de la realización física.

de otras estructuras (como la lámina de refracción en [5]), existen múltiples reflexiones en la metasuperficie, acentuando las pérdidas. Esto lleva a elegir un valor de constante de fase para el campo E_x^- tal que el ángulo de incidencia dentro de la guía sea grande para reducir las reflexiones. A su vez, esto hace conveniente considerar incidencia oblicua en lugar de normal para extraer el comportamiento de cada celda, lo que complica el diseño. Adicionalmente, la suposición de periodicidad local en la que se han diseñado las celdas se aleja de la realidad cuando las celdas adyacentes tienen huesos con dimensiones muy distintas.

Siguiendo la metodología descrita y teniendo en cuenta los aspectos de diseño antes mencionados, se ha llegado a una implementación física para el diseño de las Figs. 2 y 4 de una antena leaky-wave con radiación broadside y factor de fuga α de $0,02k_0$ de longitud 10λ a 20GHz. La Fig. 6 representa la directividad 2D y compara la obtenida del modelo teórico con la implementación física. Se observa muy buena concordancia tanto en el lóbulo principal como en la posición de los lóbulos secundarios. A pesar de que en la implementación física aparece un lóbulo secundario más acentuado, tanto la dirección de apuntamiento como el nivel de la directividad son muy parecidos a los teóricos, demostrando así la viabilidad de la implementación.

IV. CONCLUSIONES

En esta comunicación se ha abordado la realización física de una antena leaky-wave basada en metasuperficie de Huygens bianisótropa. El uso de la metasuperficie permite estipular un campo arbitrario, haciendo posible elegir el ángulo de apuntamiento y el factor de fuga de la antena. La metodología de diseño de los parámetros constitutivos de la metasuperficie parte de especificar el campo deseado debajo y encima de la superficie y se basa en expresiones cerradas. A partir de esos parámetros, se ha obtenido una implementación

física de la estructura basada en metalizaciones en forma de hueso separadas por sustrato dieléctrico. Se ha demostrado que, a pesar de la dificultad de la complejidad del problema y de todas las aproximaciones que han de hacerse, se puede conseguir una implementación física compatible con tecnología impresa. Así, se ha presentado la directividad simulada con la realización física para un diseño concreto, mostrando muy buena concordancia con el modelo teórico. Actualmente, está en proceso la caracterización experimental de un prototipo.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha recibido fondos del programa de investigación e innovación de Horizonte 2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de ayuda Marie Skłodowska-Curie número 706334.

REFERENCIAS

- [1] 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.
- [2] E. Abdo-Sánchez, A. Epstein and G. V. Eleftheriades, "Bianisotropic Huygens' Metasurface Leaky-Wave Antenna with Flexible Design Parameters," *European Conference on Antennas and Propagation.*, Paris, Mar. 2017.
- [3] Y. Ra'idi and S. A. Tretyakov, "Balanced and optimal bianisotropic particles: Maximizing power extracted from electromagnetic fields," *New J. Phys.*, vol. 15, no. 5, p. 053008, 2013.
- [4] C. Pfeiffer and A. Grbic, "Bianisotropic Metasurfaces for Optimal Polarization Control: Analysis and Synthesis," *Physical Review Applied* 2, vol. 2, no. 4, 04001, 2014.
- [5] 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," *Physical Review B*, vol. 97, no. 12, 125433, 2018.