

Antena “Leaky-Wave” en Guía-Onda basada en Metamateriales: Método de Análisis y Diseño, y Validación Experimental

J. S. Gómez-Díaz, M. García-Vigueras, A. Shahvarpour, M. Martínez-Mendoza, J. A. Lorente Acosta, A. Martínez Ros, M. Jiménez Nogales, R. Guzmán-Quirós, y A. Álvarez Melcón
 Grupo de Electromagnetismo Aplicado a las Telecomunicaciones (GEAT)
 Universidad Politécnica de Cartagena, Antiguo Cuartel de Antigones, 30202 Cartagena (Murcia)
 E-mail: jsebastian_gomez@ono.com, alejandro.alvarez@upct.es

Resumen. En este artículo se presenta una novedosa antena “leaky-wave” en guía de onda, basada en metamateriales. Para ello, la guía-onda se ha cargado con “slots” y “via-holes”, de tal forma que proporciona constantes de propagación tanto negativa como positiva, en función de la frecuencia. Esta antena es capaz de modificar la dirección de la radiación en función de la frecuencia de entrada, proporcionando un barrido completo del espacio. Para su análisis y diseño, se ha propuesto un método modal, combinado con condiciones de contorno de Floquet. De esta manera se consigue diseñar y analizar este tipo de antenas en cuestión de pocos minutos, evitando recurrir a herramientas de onda completa comerciales, que presentan unos tiempos de diseño de horas e incluso días. Medidas experimentales confirman el fenómeno de radiación previsto para la nueva antena, y validan la herramienta de análisis propuesta.

1 Introducción

Este artículo, eminentemente práctico, se centra en el análisis, diseño y fabricación de una antena “leaky-wave” [1] basada en metamateriales [2], realizada en el grupo de investigación GEAT¹ en colaboración con el Instituto Fraunhofer-FHR (Alemania). El diseño se basa en las antenas “leaky-wave” [1], que son un tipo de antenas capaz de variar la dirección de radiación en función de la frecuencia de entrada. Estas antenas se caracterizan por ir radiando conforme la onda se propaga por ellas. Las antenas “leaky” se combinan con una constante de propagación negativa obtenida gracias al efecto de los metamateriales [2], consiguiendo una radiación hacia atrás y, en menor medida, en la dirección broadside. Todo ello se obtiene usando el armónico fundamental ($n=0$) [1], sin necesidad de emplear armónicos de orden superior.

La antena propuesta se diferencia del resto de antenas leaky-wave basadas en metamateriales [2] gracias a una implementación en guía-onda, que combina “via-holes” y “slots” para conseguir un comportamiento metamaterial o “composite right/left-handed (CRLH)” [2]. Esto permite que la constante de propagación pase de valores negativos a valores positivos, con una transición suave. Un esquema de la antena propuesta puede observarse en la Fig. 1. Como se observa en la figura, la antena se basa en una guía de onda, sobre la que se abren unos “slots” longitudinales. Estos slots proporcionan la capacidad serie que se requiere para obtener un

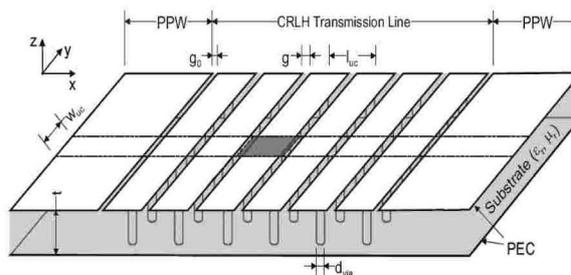


Figura 1: Esquema de la antena metamaterial “leaky-wave” en guía de onda propuesta. Una celda unitaria se encuentra resaltada en color gris en el centro de la antena.

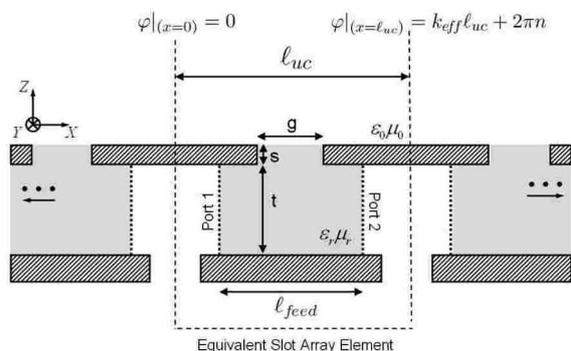


Figura 2: Corte transversal de un array de slots radiando en espacio libre, empleado para modelar la radiación de la antena propuesta.

comportamiento metamaterial [2]. Además, se utiliza una serie de “via-holes”, que proporcionan la inductancia en paralelo requerida [2]. De esta forma la celda unitaria que conforma esta antena se compone de dos trozos de guía-onda, junto a un “via-hole” y dos medias ranuras. La elección adecuada de los parámetros que los definen proporcionarán el comportamiento metamaterial buscado. Otra forma de entender este tipo de antenas es como una evolución natural de las antenas en superficie, presentadas previamente [3].

Para analizar este nuevo tipo de antenas, el grupo de investigación GEAT ha propuesto un análisis

¹ El grupo GEAT está integrado por los profesores: David Cañete Rebenaque, Jose Luis Gómez Tornero, Fernando. D. Quesada-Pereira, Pedro Vera Castejón, y Alejandro Alvarez Melcón, además de por los estudiantes firmantes del artículo.

iterativo, basado en método modales (“mode-matching” en inglés). Los pasos para el análisis son los siguientes. En primer lugar, se obtiene una celda unidad que caracteriza el comportamiento “aislado” de la línea. Posteriormente, se obtienen la frecuencia de transición (donde se pasa de un comportamiento zurdo a un comportamiento diestro), y se aplican simplificaciones para poder obtener de forma analítica las dimensiones de los “vía-hole” necesarias para obtener el comportamiento que se desee. Después se utiliza un modelo equivalente para caracterizar la radiación de la antenna (vea Fig. 2), basado en un slot aislado dentro de un array infinito de slots. En este caso, se emplean condiciones de Floquet en espacio libre, que depende directamente de la constante de propagación de la antenna completa. Finalmente, un método iterativo conecta las dimensiones físicas con los valores complejos de la constante de propagación, obteniendo una convergencia en muy pocas iteraciones. El método propuesto [4, 5] permite analizar y diseñar este tipo de antenas en tan sólo unos minutos, obteniendo, además, un conocimiento profundo acerca de la física que describe el complejo fenómeno de radiación de este tipo de antenas. Cabe destacar que un análisis similar utilizando herramientas comerciales (comúnmente conocidas como “full-wave”) requiere de varias horas, con lo que un diseño completo de una antenna necesita de uno o varios días. Esta problemática en el diseño de antenas queda completamente resuelta utilizando el método de análisis y diseño propuesto en [4, 5].

2 Antena CRLH PPW Leaky-Wave

Utilizando el método propuesto por el grupo de investigación GEAT en [5], se ha diseñado una antenna “leaky-wave” basada en metamateriales, usando la tecnología guía-onda cargada con “via-holes” y “slots”. Para ello, se han combinado un total de 14 celdas unidad. Una fotografía de la antenna fabricada puede observarse en la Fig. 3.

En la Fig. 4 se observa el coeficiente de reflexión de la antenna, presentando una comparativa entre el resultado obtenido con el método de análisis propuesto frente a medidas experimentales. La antenna presenta una frecuencia de transición a 9.3 GHz. En la zona zurda (menor que 9.3 GHz), la radiación es mucho más importante que en la zona diestra, lo que conlleva un valor del coeficiente de reflexión mucho más pronunciado. En la zona diestra, aparece un interesante efecto de “rizado”, debido a que parte de la energía no se ha radiado al llegar al final de la antenna, y es “reflejada” de vuelta hacia la antenna por la discontinuidad con el espacio libre. Esto crea una onda estacionaria en el coeficiente de reflexión, además de provocar unos lóbulos secundarios que apuntan hacia atrás. Este fenómeno es debido a que la constante de radiación en esta zona es menor, y puede resolverse fabricando una antenna con un mayor número de celdas (con el fin de que la mayor parte de la energía sea radiada).

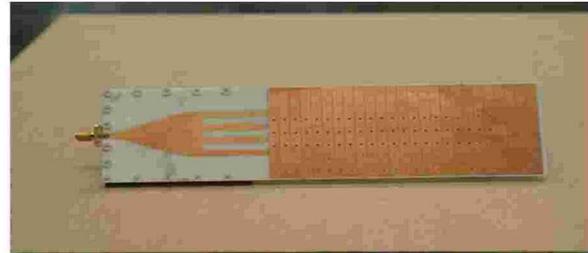


Figura 3: Fotografía de una antena metamaterial en guía de onda, compuesta por 14 celdas unitarias.

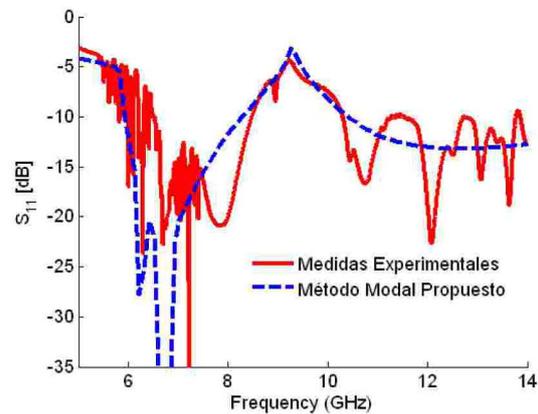


Figura 4: Coeficiente de reflexión de la antenna propuesta. Medidas experimentales validan el método de simulación empleado.

En la Fig. 5 se presenta un análisis completo de la radiación (campo eléctrico normalizado) producido por la antenna propuesta. En el eje de abscisas se observa la frecuencia de funcionamiento de la antenna, mientras que en el de ordenadas, el ángulo espacial donde se observa esta radiación. Este ángulo está medido respecto de la normal de la antenna. Así, un ángulo de $\theta=0^\circ$ corresponde a la dirección perpendicular a la antenna (“broadside”), mientras que un ángulo negativo $\theta<0^\circ$ corresponde a una radiación hacia atrás (o “backward” en inglés) y un ángulo positivo $\theta>0^\circ$ a una radiación hacia adelante (o “forward” en inglés). En la figura, se aprecia como la antenna propuesta es capaz de radiar desde “backward” hasta “forward”. Es interesante destacar que se produce una reducción de la radiación en la dirección “broadside”. Ello es debido a que el equivalente circuital de la antenna presentada no tiene una resistencia de radiación en paralelo. Por ello, esta antenna presenta un fenómeno curioso; está balanceada (es decir, la constante de propagación es capaz de pasar suavemente de valores negativos a valores positivos) pero no es capaz de radiar de forma eficiente en broadside. También es interesante notar como el efecto de rizado que se observa en los parámetros S (ver Fig. 4) a altas frecuencias, se traduce en una serie de lóbulos secundarios en la dirección opuesta (valores de θ negativos). Ello es debido a que la energía que se ha reflejado, vuelve a ser introducida en la antenna, y a ser re-radiada en la dirección opuesta.

Finalmente, en la Fig. 6 se presentan dos cortes del diagrama de radiación en el plano E para dos frecuencias diferentes. Concretamente, se ha elegido una frecuencia que presenta una radiación hacia atrás

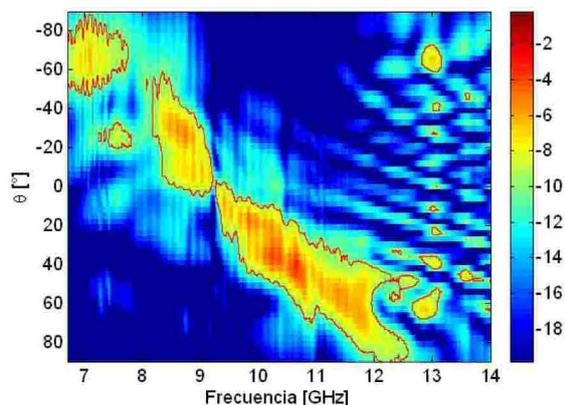


Figura 5: Resultados experimentales de la radiación en el plano E, para todo rango de frecuencias. El escaneo del espacio en función de la frecuencia es claramente apreciable.

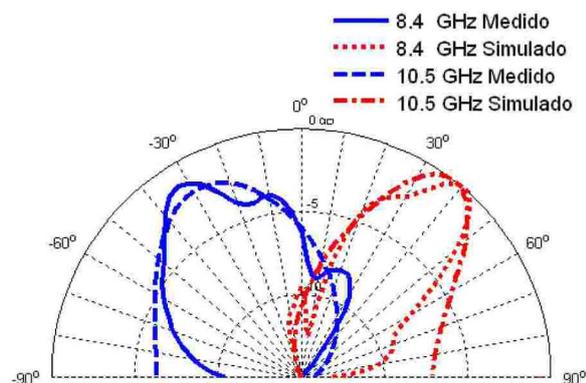


Figura 6: Diagrama de radiación de la antena (en el plano E) para dos frecuencias, mostrando el escaneo en espacio. Medidas experimentales son empleadas como validación.

(“backward”, correspondiente a 8.4 GHz) y una frecuencia que presenta una radiación hacia delante (“forward”, correspondiente a 10.5 GHz). De esta forma se demuestra el escaneo de haz obtenido con la antena propuesta, obteniéndose una concordancia excelente entre los valores experimentales y los obtenidos con el método de simulación propuesto [5].

En un futuro próximo se prevé un uso masivo de este tipo de antenas, especialmente en comunicaciones móviles. La gran ventaja que presentan respecto a las antenas actuales es que son capaces de modificar la dirección del haz de forma dinámica. Ello facilita que la radiación sea capaz de “seguir” a cualquier usuario, se encuentre donde se encuentre, confinando la energía hacia él. Esto supone un ahorro tremendo de energía consumida, ya que en la actualidad la mayor parte de la energía radiada por las antenas de telefonía no se dirige de forma directa hacia el usuario.

3 Conclusiones

En este artículo se ha presentado una novedosa antena “leaky-wave” en guía onda, basada en un comportamiento metamaterial. Concretamente, se han empleado “via-hole” y “slots” para cargar la guía, consiguiendo una zona frecuencial donde la constante de propagación se hace negativa (y proporciona una radiación hacia atrás) y otra zona frecuencial donde la constante de propagación se hace positiva (y

proporciona una radiación hacia adelante). Además, se ha presentado un método de diseño modal, combinado con condiciones de contorno periódicas de Floquet. De esta forma se consigue tanto el análisis como el diseño de este tipo de antenas en tan solo minutos, sin necesidad de recurrir en ningún momento a métodos de simulación “full-wave” (que requieren al menos varias horas). Finalmente, se han presentado medidas experimentales que confirman los fenómenos de radiación previstos, y validan completamente el método de diseño y simulación propuesto

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (España) [Ref. TEC2007-67630-C03-02 y beca FPU-AP2006-015], y por la Fundación Séneca de la Región de Murcia Ref. 08833/PI/08.

Referencias

- [1] A. A. Oliner and D. R. Jackson, “Leaky-wave antennas,” in *Antenna Engineering Handbook*, 4th ed., J. L. Volakis, Ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [2] C. Caloz and T. Itoh, “Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications”. New Jersey: Wiley-Interscience,
- [3] T. Bertuch, “A TM leaky-wave antenna comprising a textured surface,” in *Proc. Int. Conf. Electromag. Adv. Appl. (ICEAA)*, Sept. 2007.
- [4] J. S. Gómez-Díaz, A. Álvarez Melcón and T. Bertuch, “An Iteratively-Refined Circuitual Model of CRLH Leaky-Wave Antennas based on a Mushroom Structure”, *IEEE Antennas and Propagation Symposium*, Toronto (Canada), 2010.
- [5] J. S. Gómez-Díaz, A. Álvarez-Melcón and T. Bertuch, “A Modal-Based Iterative Circuit Model for the Analysis of CRLH Leaky-Wave Antennas comprising Periodically Loaded PPW”, *IEEE Trans. Antennas and Propagation* [en revisión].