

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA MEJORA DE POTENCIA RADIADA POR UN DIPOLO MEDIANTE UN SUPERESTRATO LEFT HANDED

E. Sáenz⁽¹⁾, R. Gonzalo⁽¹⁾, I. Ederra⁽¹⁾, P. de Maagt⁽²⁾

elena.saenz@unavarra.es, ramon@unavarra.es, inigo.ederra@unavarra.es, Peter.de.Maagt@esa.int

⁽¹⁾Dpto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadía 31006 Pamplona (España)

⁽²⁾European Space Research and Technology Centre, ESTEC. PO Box 299, NL 2200 AG Noordwijk (The Netherlands)

Abstract- In this paper a comparison between the measured radiation performances of a single dipole and a dipole with a left handed superstrate based on a finite periodic repetition of a unit cell is presented. First of all the return losses and resonant frequency of the dipole has been measured for different sizes of the superstrate, having a good impedance matching and a decrease in the resonant frequency as the number of cells increase. By using an anechoic chamber and a receiver horn antenna, the power transmitted at boresight has been measured for different frequencies, observing a filtering behaviour due to the resonant characteristic of the superstrate and an improvement of the power transmitted at the resonant frequency of around 3.5 dB. Comparing the H and E plane radiation patterns of a dipole and the dipole with superstrate, more symmetrical and directive radiation patterns can be observed. Finally, a comparison between the simulated and measured aperture efficiency is presented with a good agreement between them.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el estudio de los metamateriales (MTMs), tanto *Photonic Band Gaps* (PBGs) como *Left Handed Materials* (LHMs), está creciendo notablemente debido al enorme potencial de esta tecnología. Recientes estudios han demostrado la utilidad de estos MTMs para diferentes aplicaciones [1]-[10]. Los materiales LH pueden entenderse como resonadores que presentan bandas de paso y bandas de rechazo a las cuales la potencia se transmite o se refleja.

Hasta ahora, los MTMs han sido utilizados para crear conductores magnéticos artificiales (AMC) para aplicaciones de antenas [3]. Trabajando en la banda de rechazo como substratos de antenas en vez de planos de masa, se han obtenido mejoras de la directividad y reducción de la radiación trasera. Sin embargo, nuevas aplicaciones de los LHM han surgido como superestratos de antenas planas trabajando en las bandas de paso, mejorando las propiedades de radiación de las mismas [5]-[10].

En este trabajo se presenta una comparación entre las propiedades de radiación de un dipolo simple y un dipolo con un superestrato LH. Se han realizado medidas del S_{11} , la ganancia y los diagramas de radiación para diferentes tamaños del superestrato. Finalmente, se muestra una comparación entre la eficiencia de apertura obtenida en las medidas y la predicha por la simulaciones realizadas con Ansoft-HFSS.

II. SUPERESTRATO LEFT HANDED

El medio Left Handed utilizado como superestrato de la antena dipolo es una estructura periódica finita basada en la celda unidad descrita en [4]-[7]. Dicha celda está formada por un *Split Ring Resonator* (SRR), o elemento de permeabilidad negativa ($\mu < 0$), y dos pares de *Capacitively Loaded Strips* (CLSs), o elementos de permitividad negativa ($\epsilon < 0$), inmersos en un slab dieléctrico (ver Fig. 1).

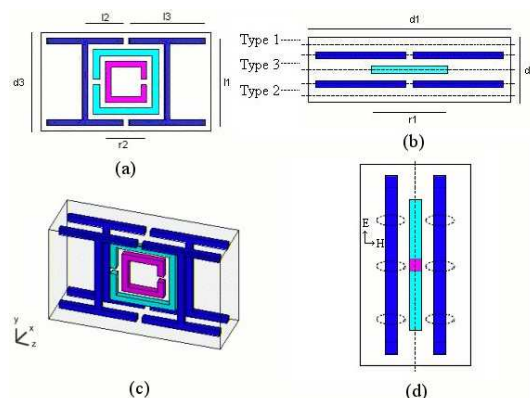


Fig. 1. Geometría de la celda unidad. Anchura de los gaps y las líneas = 0.254 mm , $d_1=7.366 \text{ mm}$, $d_2=1.944 \text{ mm}$, $d_3=4.318 \text{ mm}$, $l_1=3.81 \text{ mm}$, $l_2=1.778 \text{ mm}$, $l_3=3.556 \text{ mm}$, $r_1=2.794 \text{ mm}$, $r_2=1.778 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 2.2$. (a) Vista frontal. (b) Vista superior. (c) Perspectiva. (d) Cancelación de las corrientes en el plano de simetría.

El efecto Left Handed no se obtiene directamente mezclando elementos de permeabilidad negativa y elementos de permitividad negativa, sino teniendo al mismo tiempo $\mu < 0$ y $\epsilon < 0$. En este caso, debido a la posición simétrica de los CLSs con respecto al SRR, las corrientes magnéticas creadas por los CLSs se cancelan en el plano de simetría donde está colocada el SRR (ver Fig. 1 (d)). Por tanto, ϵ y μ son negativos simultáneamente, lo que produce un índice de refracción negativo $n < 0$.

Aunque el efecto de refracción negativa ocurre en las bandas de paso de la celda, éste no será el que se explote. Como se verá a continuación, trabajando en dichas bandas de paso se obtiene una iluminación uniforme de la superficie de radiación lo que produce una mejora de la ganancia y eficiencia de apertura.

Para construir la celda básica unitaria, se siguió un proceso de capeado, el cual está explicado en [6]-[7]. Cada una de las celdas está compuesta por 6 capas, dos del tipo 1, dos del tipo 2 y dos del tipo 3, las cuales apiladas siguiendo un patrón 123321 formán la celda (ver Fig. 1 (b)). En la Fig. 2 puede verse un detalle de los SRRs y CLSs impresos en las capas.

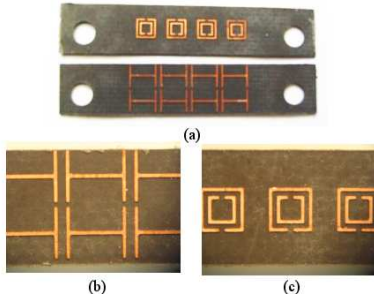


Fig. 2. Detalle de las celdas construidas. (a) Ambas caras de una capa. (b) CLSs. (c) SRRs.

Una de las ventajas de esta técnica de fabricación es que el número de periodos que constituyen el superestrato no es fijo, sino que puede modificarse variando el número de capas apiladas.

III. PROPIEDADES DE RADIACIÓN

Para comprobar la mejora de las propiedades de radiación de un dipolo debido a la utilización de un superestrato LH, el parámetro S_{11} y el diagrama de radiación en planos E y H se han medido y comparado con los del dipolo simple.

Para excitar correctamente el superestrato se requiere un campo E paralelo a los CLSs y un campo H axial al SRR. Para ello se diseñó un dipolo $\lambda/2$ alimentado por un balún coaxial y se utilizó como punto de referencia.

El efecto del superestrato se ha estudiado mediante un análisis paramétrico variando el número de periodos del mismo en la dirección x de 2 a 12 (ver Fig. 3).

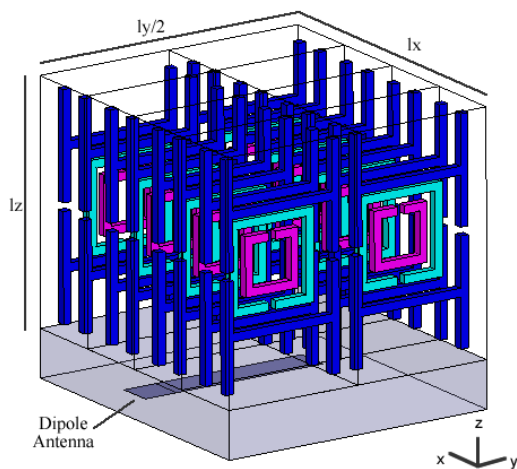


Fig. 3. Antena dipolo y superestrato formado por 4 celdas en la dirección x.

A. Parámetro S_{11}

En primer lugar se midió el parámetro S_{11} del dipolo con superestrato utilizando para ello un analizador de redes, tal y como se observa en la Fig. 4.

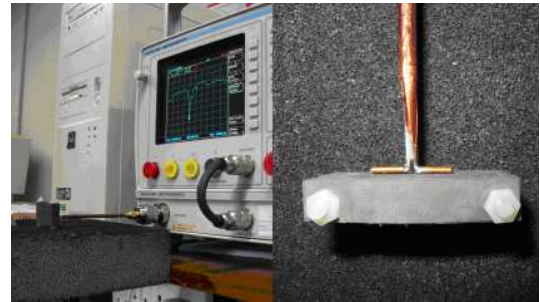


Fig. 4. Analizador de redes para la medida del parámetro S_{11} .

En la Fig. 5 se pueden ver los resultados del análisis de la magnitud del parámetro S_{11} frente a la frecuencia para todas las configuraciones medidas (de 2 a 12 celdas). En todos los casos se ha obtenido una adaptación mejor de -12 dB.

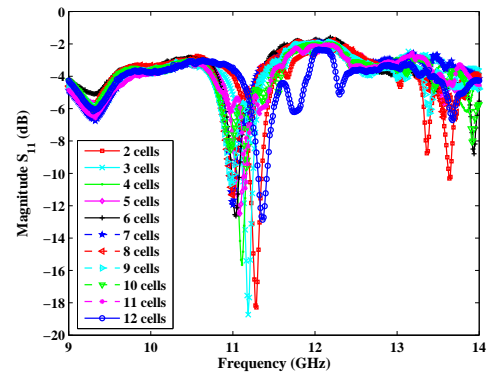


Fig. 5. Magnitud del S_{11} vs frecuencia.

B. Ganancia y diagramas de radiación

Para caracterizar la mejora de las propiedades de radiación debidas al superestrato, se calculó la ganancia a $\theta = 0$ y se midieron los diagramas de radiación en planos E y H. Para ello se utilizó una cámara anecoica, una antena de bocina de ganancia conocida como receptora y el dipolo (con y sin superestrato) como antena transmisora. El superestrato se colocó pegado al dipolo de forma que se maximizara la potencia radiada a $\theta = 0$ (ver Fig. 6).

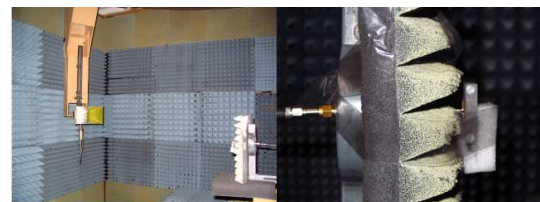


Fig. 6. Sistema de medida de los diagramas de radiación: cámara anecoica, antena de bocina y dipolo con superestrato.

Colocando la bocina receptora en frente del dipolo transmisor ($\theta = 0$) y analizando la potencia recibida en función de

la frecuencia (ver Fig. 7), puede observarse un efecto de filtrado debido a las propiedades paso banda del superestrato. Al igual que en el caso del S_{11} se realizó un análisis paramétrico variando el número de celdas en la dirección x de 2 a 12. En todos los casos se obtuvieron resultados similares a los presentados en la Fig. 7, la cual corresponde al caso de un superestrato con 9 celdas. Comparando la potencia recibida con el superestrato con el caso del dipolo simple, puede observarse una mejora de 3.5 dB aproximadamente entorno a la frecuencia de resonancia del superestrato (11 GHz) y un rechazo de -10 dB fuera de dicha banda.

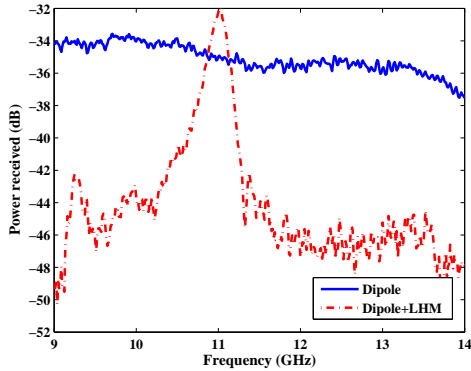


Fig. 7. Potencia recibida vs frecuencia para el caso de un superestrato formado por 9 celdas.

Midiendo la potencia recibida P_R a la frecuencia de resonancia y teniendo en cuenta la potencia transmitida P_T , la ganancia de la bocina receptora G_R para cada frecuencia, la distancia entre antenas d y la frecuencia de trabajo λ , la ganancia de la antena transmisora G_T puede calcularse aplicando la ecuación de Friis (1).

$$G_T(dB) = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) + P_R - P_T - G_R \quad (1)$$

Calculando la ganancia a $\theta = 0$ para distintos tamaños del superestrato (ver Fig. 8), puede verse cómo al aumentar el número de celdas, es decir, la superficie de radiación, la ganancia también aumenta. Sin embargo, se produce un efecto de saturación para superestratos mayores de 6 celdas. Esto se debe a la aparición de una onda estacionaria en la dirección transversal del superestrato que limita el tamaño máximo del mismo para el cual se obtiene mejora de ganancia. Teniendo en cuenta los posibles errores en la calibración, equipos y medidas, la incertidumbre de la ganancia medida es de ± 0.5 dB.

A continuación se midieron los diagramas de radiación en planos E y H con y sin superestrato para todos los tamaños analizados, observándose la mejora obtenida en términos de ganancia y simetría de ambos planos. Resultados similares a los mostrados en la Fig. 9 para el caso de un superestrato compuesto por 9 periodos se obtuvieron en todas las medidas. En el diagrama del plano H, la mejora es más significativa, pasando de un diagrama omnidireccional en el caso del dipolo simple a uno más directivo para el dipolo con superestrato.

C. Frecuencia de resonancia

La Fig. 10 muestra la dependencia de la frecuencia de resonancia (mínimo S_{11}) del sistema (superestrato + dipolo) y

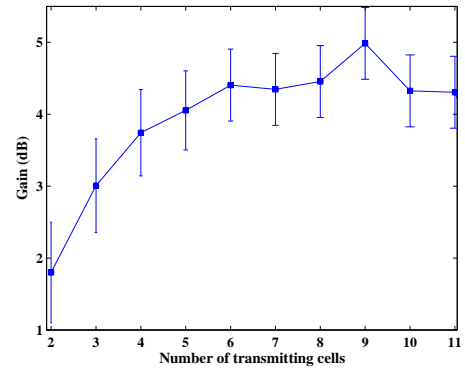


Fig. 8. Ganancia medida a $\theta = 0$ vs número de celdas. Errores = ± 0.5 dB

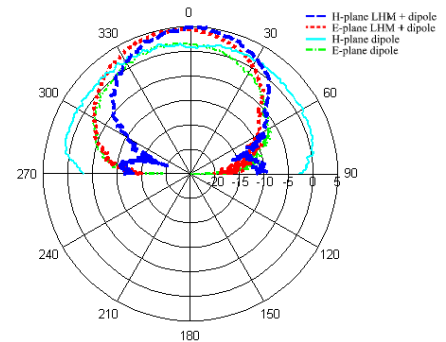


Fig. 9. Diagramas de radiación en planos E y H: dipolo simple y superestrato de 9 celdas.

la frecuencia de máxima ganancia a $\theta = 0$ con el número de celdas del superestrato. Se puede observar que ambas curvas no coinciden exactamente, sino que hay una pequeña desviación frecuencial entre ellas debido a errores en las medidas. Sin embargo, siguen un comportamiento similar; a medida que aumenta el número de celdas, la frecuencia de resonancia baja, pasando de 11.36 GHz en el caso de 2 celdas a 10.99 GHz en el caso de 10 celdas. Por otro lado, puede verse que la frecuencia de resonancia tiende a estabilizarse conforme el superestrato es mayor.

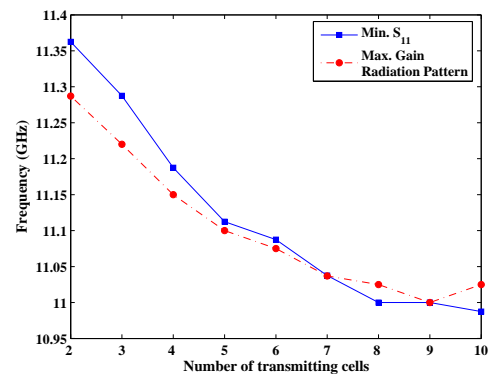


Fig. 10. Frecuencia de resonancia vs número de celdas.

D. Eficiencia de apertura

Conocida la ganancia G del sistema, puede calcularse la eficiencia de apertura η aplicando (2), donde A_{phy} representa el área física del superestrato.

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \eta A_{phy} \quad (2)$$

En la Fig. 11 se presenta una comparación entre la eficiencia de apertura obtenida en las medidas (teniendo en cuenta los errores en la medida de la ganancia) y la predicha por las simulaciones para los diferentes tamaños de superestratos analizados.

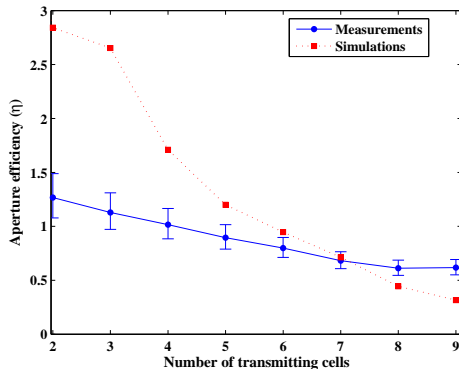


Fig. 11. Eficiencia de apertura vs número de celdas.

Para los casos de menos de 4 celdas en la dirección x , se ha obtenido una eficiencia de apertura mayor de 1. Este hecho puede explicarse teniendo en cuenta la presencia de campos en los bordes de la estructura, lo que hace que el área de radiación sea mayor que el área física produciendo así una eficiencia de apertura mayor que la unidad. Sin embargo, a medida que aumenta el número de celdas, la eficiencia disminuye. Aunque la ganancia aumenta con el número de celdas, este aumento no es proporcional al incremento de superficie, por lo que la eficiencia disminuye. Además, conforme el área física se hace mayor, el efecto borde disminuye, obteniendo el resultado esperado de una eficiencia de apertura menor que la unidad, pero mayor del 80 % para superestratos entre 2 y 6 celdas.

Dibujando el vector de Poynting en la superficie de radiación del superestrato (ver Fig. 12), puede observarse el ensanchamiento del campo radiado y la iluminación uniforme, lo que confirma la explicación previa.

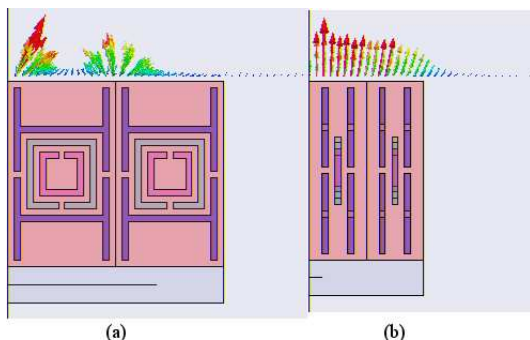


Fig. 12. Vector de Poynting en la superficie de radiación. (a) Plano E. (b) Plano H.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se han comparado las propiedades de radiación de un dipolo simple y un dipolo con superestrato *Left Handed*. Se ha realizado un análisis paramétrico de la influencia del superestrato en las propiedades de radiación del sistema variando el número de periodos del superestrato en la dirección x de 2 a 12. En todos los casos se ha obtenido una buena adaptación con unas pérdidas de retorno S_{11} a la frecuencia de resonancia inferiores a -12 dB. Se ha observado que a medida que aumenta el número de periodos, es decir, aumenta la superficie de radiación, aumenta la ganancia y baja la frecuencia de resonancia. Sin embargo, se produce un efecto de saturación de ganancia para superestratos de más de 6 celdas. Midiendo la potencia radiada por el dipolo con superestrato a $\theta = 0$ y comparándola con la radiada por el dipolo simple, se obtuvo una mejora de ganancia media entorno a la frecuencia de resonancia del superestrato de 3.5 dB aproximadamente. Comparando los diagramas de radiación en planos E y H a la frecuencia de resonancia, se puede observar que son más simétricos y directivos en el caso del superestrato. Finalmente, se ha calculado la eficiencia de apertura η observando que decrece a medida que aumenta el número de celdas, siendo superior al 80 % hasta 6 celdas.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado ha sido financiado por el Gobierno de Navarra bajo la resolución 17/2004, el Ministerio de Educación y Ciencia con el contrato TIC-2003/09317-C03-01 y la Red de Excelencia METAMORPHOSE de la Comunidad Europea bajo el contrato NMP3-CT-2004-50252.

REFERENCIAS

- [1] V. G. Veselago, *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ* . Sov. Phys. Uspekhi, 1968, Vol. 10, No 4, pp. 509-514.
- [2] J. B. Pendry, *Negative refraction makes a perfect lens*. Physical Review Lett, 2000, Vol. 85, No 18, pp. 3966-3969.
- [3] A. Erentok, P. L. Luljak, R. W. Ziolkowski, *Characterization of a volumetric metamaterial realization of an artificial magnetic conductor for antenna applications*. IEEE Tran. Antennas and Prop, 2005, Vol. 53, No. 1, pp. 160-172.
- [4] R. W. Ziolkowski, *Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials*. IEEE Trans. Antennas and Prop., 2003, Vol. 52, No 7, pp. 1516-1529.
- [5] E. Sáenz, R. Gonzalo, I. Ederra, P. de Maagt, *High efficient dipole antennas by using left-handed superstrates*. Proc. 13th International Symposium on Antennas JINA 2004.
- [6] E. Sáenz, R. Gonzalo, I. Ederra, P. de Maagt, *Transmission enhancement between rectangular waveguides by means of a left handed media*. Electronics Letters, 2005, Vol. 41, No 13, pp. 725-727.
- [7] E. Sáenz, I. Ederra, R. Gonzalo, P. de Maagt, *Application of left handed superstrate to improve radiation performances of dipole antennas*. European Microwave Applications, accepted.
- [8] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, W. S. Park, *Design of a high-directivity electromagnetic band gap (EBG) resonator antenna using a frequency-selective surface (FSS) superstrate*. Microwave and Optical Technology Lett, 2004, Vol. 42, No 6, pp. 462-467.
- [9] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, W. S. Park, *Application of electromagnetic bandgap (EBG) superstrates with controllable defects for a class of patch antennas as spatial angular filters*. IEEE Trans. Antennas and Prop, 2005, Vol. 53 No. 1, pp. 224-235.
- [10] P. Ikonen, C. Simovski, S. Tretyakov, *Compact directive antennas with a wire-medium artificial lens*. Microwave and Optical Technology Lett, 2004, Vol. 43, No. 6, pp. 467-469.