



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

**“HIGH EFFICIENT AND DIRECTIVE DIPOLE
ANTENNAS BY MEANS OF LEFT-HANDED MEDIA”**

Elena Sáenz Sainz

Tutor: Ramón Gonzalo García

Pamplona, Septiembre 2004



RESUMEN DE LA MEMORIA

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día muchos grupos de trabajo están investigando sobre los denominados metamateriales (MTMs). Por MTMs se entienden materiales contruidos artificialmente que poseen propiedades electromagnéticas que no se encuentran normalmente en la naturaleza. Un tipo importante y novedoso de metamateriales son los llamados materiales *Left-Handed* (LHM) o materiales zurdos, los cuales fueron descubiertos en los años sesenta por el profesor Veselago [1]. Debido a su interesante comportamiento, se está trabajando en descubrir posibles aplicaciones de estos materiales.

Los materiales *left-handed* se caracterizan por poseer simultáneamente una permitividad eléctrica ε y una permeabilidad magnética μ negativas. Como consecuencia, el vector de Poynting \vec{S} es antiparalelo al vector de onda \vec{k} por lo que las velocidades de fase y de grupo son también antiparalelas. Así, un cambio simultáneo en el signo de ε y μ supone que la tupla de vectores \vec{k} , \vec{E} y \vec{H} pase de ser a derechas a ser a izquierdas (ver Figura 1). Esto supone que la luz se propague en sentido opuesto al flujo de energía.

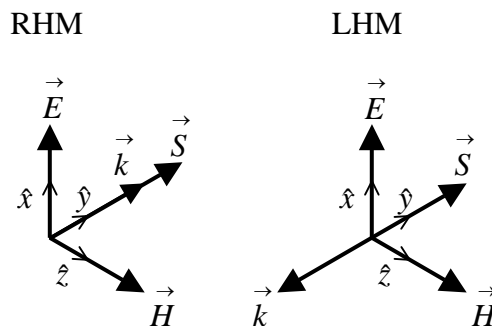


Figura 1. Tupla de vectores k , E y H en un medio RHM y LHM

La principal consecuencia de estos valores negativos de ε y μ es que el índice de refracción del medio LHM es también negativo, lo que supone importantes cambios en diferentes efectos físicos, como puede ser la inversión del desplazamiento Doppler, la inversión de la radiación de Cherenkov y cambios en las ecuaciones de Fresnel y en el principio de Fermate. Además, uno de los principios más básicos de la óptica como es la ley de Snell también sufre una inversión en la interfaz entre un medio *left-handed* y un medio



normal o *right-handed*. Así, las ondas electromagnéticas al atravesar dicha interfaz sufren una refracción negativa.

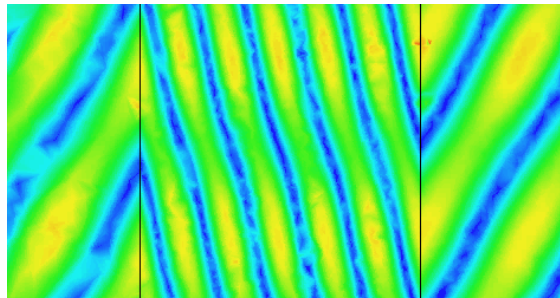


Figura 2. Refracción negativa de un haz gaussiano al atravesar un material Left-Handed

Existen otras características importantes de los materiales LHM, como puede ser la posesión de bandas de frecuencias de paso y bandas de rechazo. Dichos materiales pueden entenderse como resonadores, los cuales cuando trabajan a la frecuencia de resonancia (banda de paso), permiten la transmisión de potencia. Sin embargo, cuando la frecuencia de trabajo está alejada de la frecuencia de resonancia (banda de rechazo), la potencia es reflejada. Esta característica será la que constituya la base de este proyecto.

Hasta ahora, los materiales Left-Handed se habían usado [2] en aplicaciones de antenas como reflectores, trabajando en las bandas de rechazo, de manera que actuaban como Artificial Magnetic Conductor (AMC) en frente de una antena dipolo. Sin embargo, desde nuestro conocimiento, esta es la primera vez que este tipo de medios se usan para mejorar las propiedades de radiación de un sistema radiante desde un punto de vista de transmisión, es decir, usados como superestratos que trabajan e las bandas de paso.

Dada la novedad de la idea surgida, se ha solicitado la patente de este tipo de configuraciones, siendo el título de la misma “Estructuras “left-handed” como superestratos y/o substratos de antenas planas”.

II. DESARROLLO DEL PROYECTO

Este proyecto se ha dividido en dos partes principales. Tal y como se ha dicho, los materiales *left-handed* son muy novedosos, por lo que su funcionamiento no es muy conocido y sus aplicaciones están poco desarrolladas. Por tanto, el principal objetivo de la primera parte del proyecto pasó por comprender el comportamiento de la celda unidad seleccionada para crear el medio *left-handed*. En la segunda parte, una vez conocidas las posibilidades que ofrecía la celda unidad, el principal objetivo fue la aplicación de estos medios como



superstratos o substratos de antenas para mejorar los principales parámetros de radiación, como puede ser la directividad, el diagrama de radiación, la radiación trasera y la eficiencia.

- **Celda unidad**

En primer lugar, se seleccionó una celda unidad diseñada por Ziolkowski [3] y que posteriormente se utilizó para crear los medios left-handed. Analizando su funcionamiento bajo incidencia normal con el software Ansoft HFSS, se observó que dicha celda poseía bandas de frecuencias de paso ($S_{21} \rightarrow 1$) y de rechazo ($S_{11} \rightarrow 1$) debido a su naturaleza resonante. Dichas bandas podían ser modificadas variando las dimensiones de la celda [4].

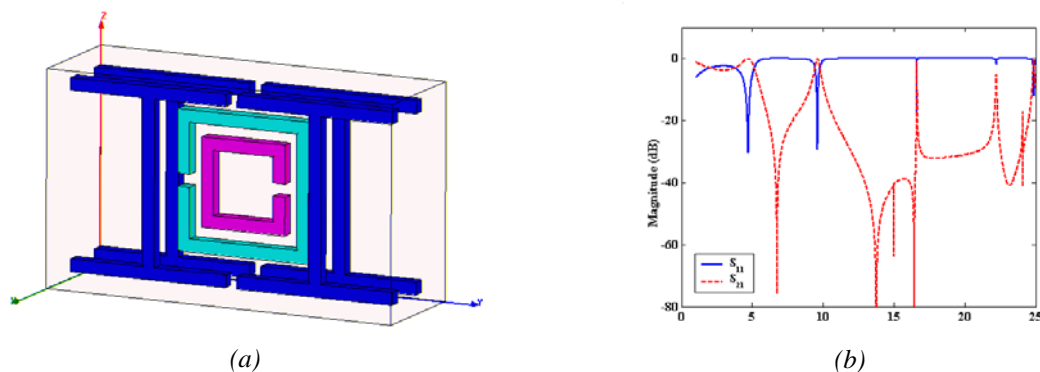


Figura 3. (a) Celda unidad seleccionada (b) Parámetros S bajo incidencia normal

Analizando los principales parámetros característicos de la celda, es decir, ϵ , μ y n , se comprobó que a dichas frecuencias de resonancia, la parte real de la permitividad y la permeabilidad tomaban valores negativos y por tanto el índice de refracción se hacía también negativo, tal y como se observa en la Figura 4.

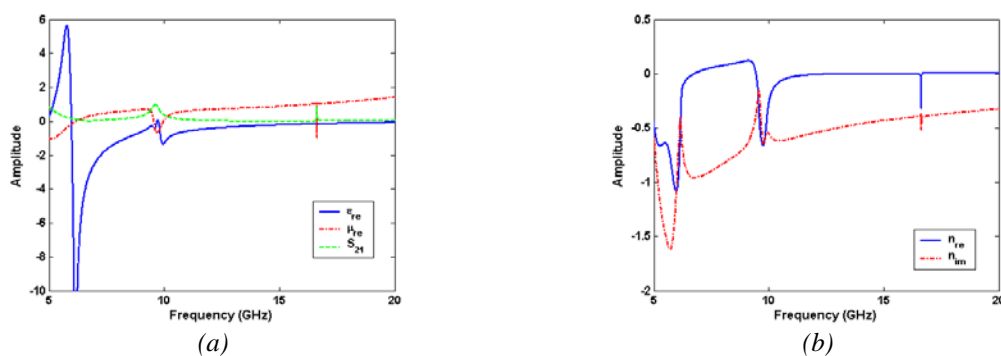


Figura 4. (a) Permitividad, permeabilidad (b) Índice de refracción

Analizando la dirección de las corrientes a las distintas frecuencias de resonancia, se concluyó que la única frecuencia apropiada para la transmisión era la de 9.57 GHz. A dicha



frecuencia las corrientes en ambos anillos giran en la misma dirección, por lo que la resonancia se ve favorecida.

- **Superestratos y substratos**

Conocidas las características de la celda unidad, se diseñaron varios superestratos y substratos combinando celdas de diferentes tamaños. Algunos ejemplos de los superestratos pueden observarse en la Figura 5.

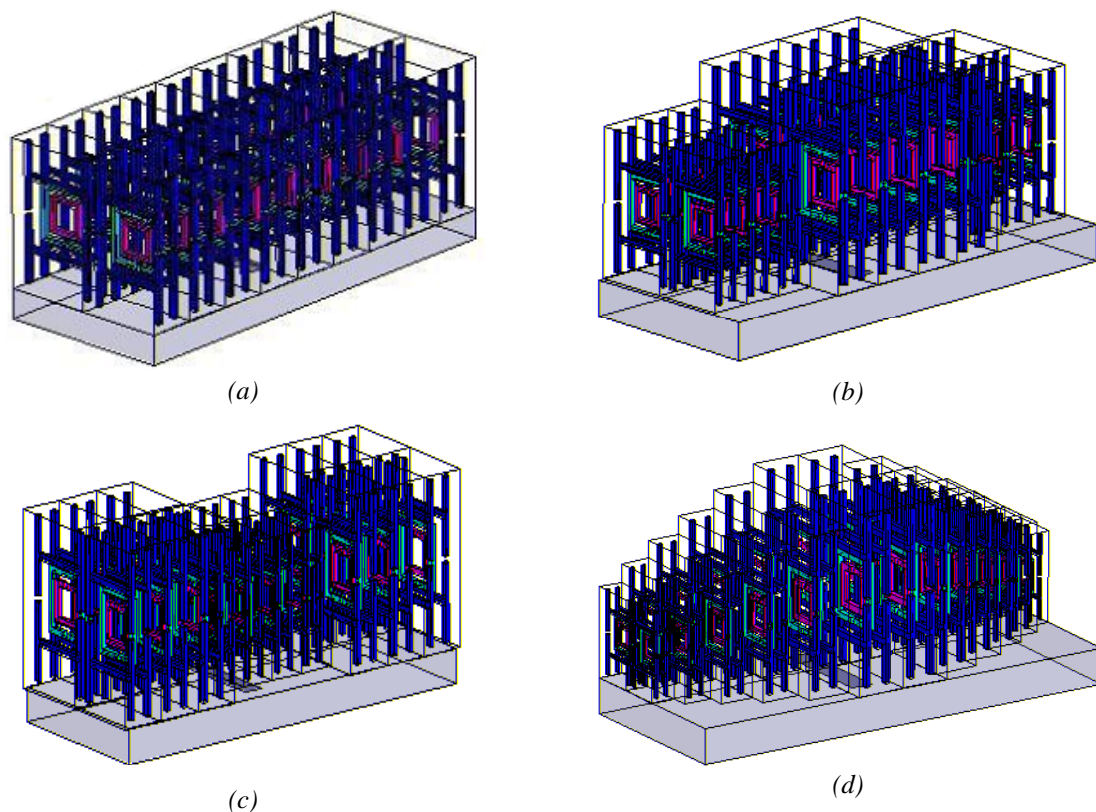


Figura 5. Ejemplos de los superestratos analizados

En primer lugar se analizó el comportamiento de superestratos y substratos, tanto uniformes como no uniformes, cuando únicamente eran excitados por una antena. Se colocaron sobre un dipolo sintonizado a la frecuencia de resonancia de la celda unidad y se estudiaron las mejoras obtenidas en los parámetros de radiación [5].

En la Figura 6 se muestran algunas de las mejoras obtenidas con el superestrato (b) de la Figura 5 formado por cuatro celdas centrales grandes rodeadas por dos celdas pequeñas a cada lado. La idea de esta configuración es crear una cavidad resonante de forma que la potencia radiada por el dipolo sea absorbida por el superestrato, mejorando así la directividad, la forma del diagrama de radiación y la radiación trasera. En cuanto a la directividad, puede



observarse una mejora de unos 5.5 dB respecto al caso del dipolo simple, lo cual puede ser entendido como una mejora de ganancia debido a la utilización del superestrato LHM.

Si nos fijamos en el diagrama de radiación, vemos que se ha obtenido un diagrama muy simétrico tanto en el plano E como en el plano H, consiguiendo además una gran reducción de la radiación trasera.

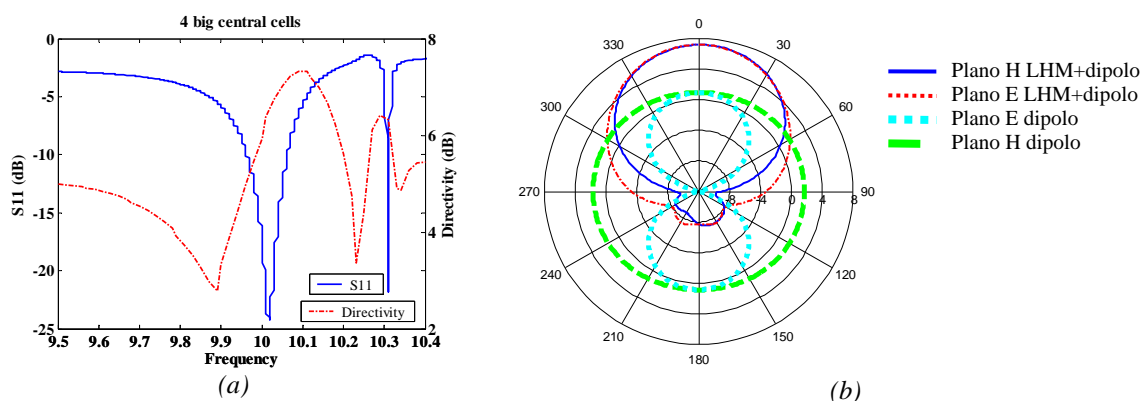


Figura 6. (a) Directividad y S_{11} vs frecuencia. (b) Diagrama de radiación LHM+ dipolo vs dipolo simple.

• Configuración array

El siguiente paso fue el análisis de una configuración array. Para ello, se estudiaron diferentes estructuras formadas por varias antenas dipolo, un superestrato sobre el array y/o un substrato bajo él. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de esta configuración.

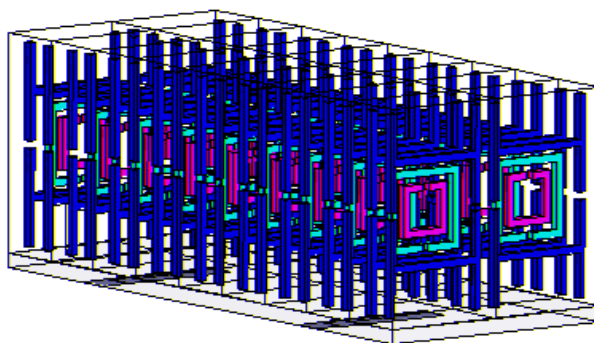


Figura 7. Configuración array formada por dos dipolos y superestrato

Con respecto a esta estructura se ha realizado un exhaustivo análisis de la dependencia de los parámetros de radiación con la posición relativa de los dipolos, analizando la influencia de la distancia de los dipolos al superestrato y de la separación entre dipolos.

Por otro lado, se ha estudiado el efecto de las pérdidas reales debidas a las pistas de cobre de los CLSs y SRRs y las pérdidas del dieléctrico en las características de radiación,



directividad, eficiencia de apertura, ganancia y eficiencia de radiación [6]. Algunos de los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8.

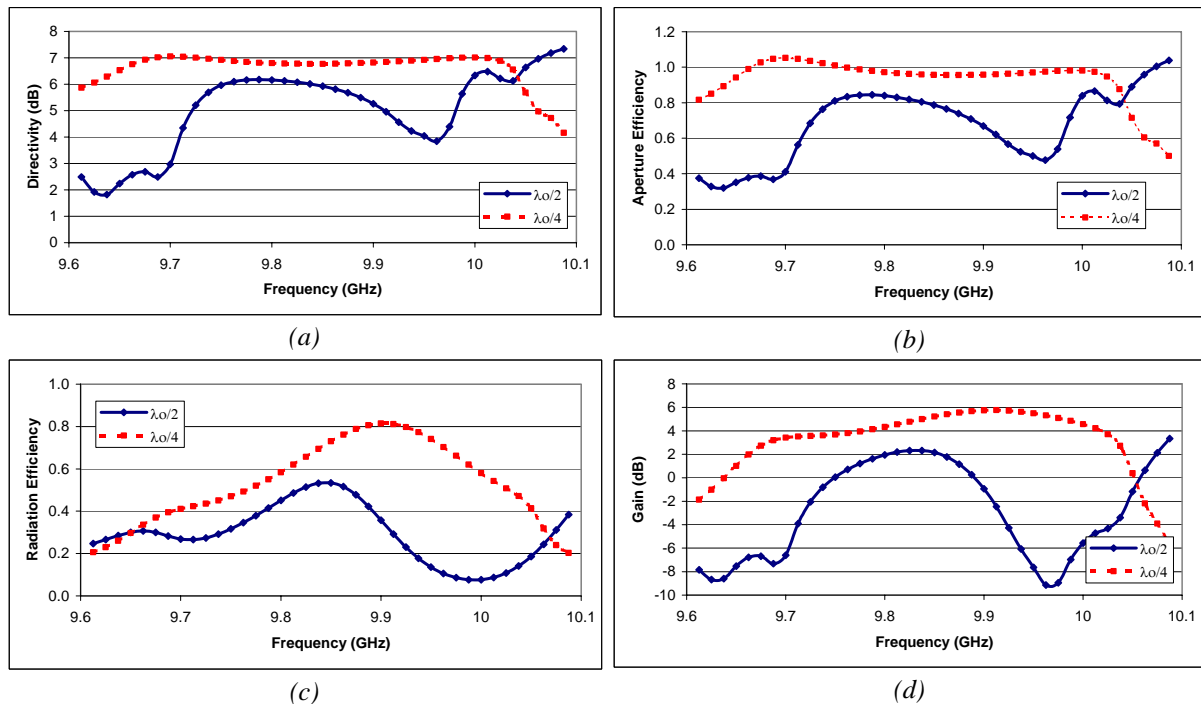


Figura 8. Parámetros de radiación (a) Directividad (b) Eficiencia de apertura (c) Eficiencia de radiación (d) Ganancia

En el caso de una distancia entre dipolos de $\lambda_0/4$, se obtienen mayores directividades en un ancho de banda mayor, con valores entorno a 7 dB. Puesto que el acoplo entre dipolos es menor, la eficiencia de radiación es mayor (0.81 @ 9.91 GHz). Teniendo en cuenta la directividad, la eficiencia de apertura y la eficiencia de radiación, se calcula la ganancia, obteniéndose un valor de 6 dB a 9.91 GHz. Dado que se trata de una estructura resonante, esta configuración posee un ancho de banda de operación reducido.

Hoy en día las comunicaciones móviles están en pleno auge, por lo que han aparecido diferentes estándares que trabajan en diferentes bandas de frecuencias. Como consecuencia existe un creciente interés en las antenas multifrecuenciales capaces de trabajar simultáneamente en los diferentes estándares. Por tanto, dada esta posible aplicación de nuestra configuración, se ha analizado el comportamiento de un array uniforme, formado por dos dipolos sintonizados a la misma frecuencia de resonancia y un array multifrecuencial con dos dipolos radiando a una frecuencia y un tercero radiando a otra frecuencia diferente. Los resultados obtenidos se muestran en las Figura 9 y 10 pudiendo observarse un bajo acoplo entre dipolos, alta directividad y un diagrama de radiación muy simétrico y con baja radiación trasera.

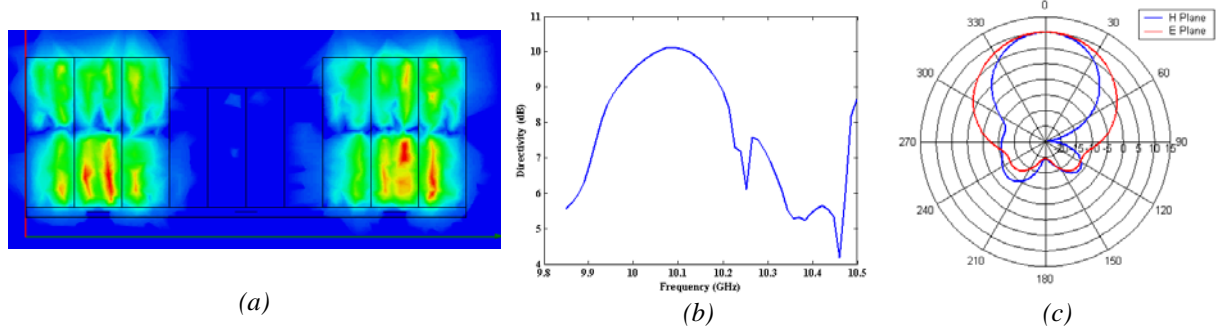


Figura 9. Comportamiento de un array no uniforme formado por tres dipolos radiando los dos dipolos de los extremos (a) Campo E (b) Directividad (c) Diagrama de radiación

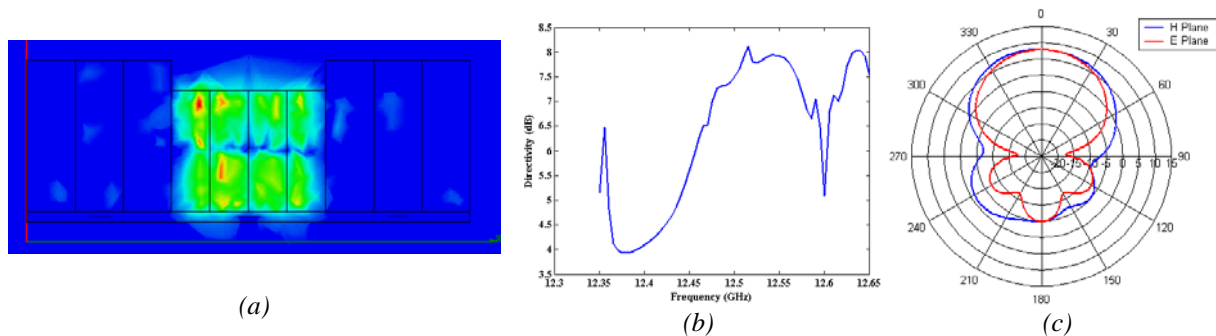


Figura 10. Comportamiento de un array no uniforme formado por tres dipolos radiando el dipolo central (a) Campo E (b) Directividad (c) Diagrama de radiación

En este trabajo se ha probado que usando superestratos y substratos sintonizados a la misma o diferente frecuencia que los dipolos se puede seleccionar la transmisión o reflexión de la potencia radiada. Se ha visto que es posible conformar correctamente el haz usando estratos muy finos y con un gran aislamiento entre antenas.

Debido al gran tamaño de las estructuras analizadas, hubo una limitación en la máxima dimensión de los arrays estudiados. Por tanto, únicamente se ha trabajado con arrays de dos y tres antenas, los cuales fueron de tipo dipolo por ser las antenas planas existentes más simples. Sin embargo, este estudio es totalmente general pudiendo ser extendido a otro tipo de antenas planas como parches o ranuras.

III. CONSTRUCCIÓN Y MEDIDA

- **Construcción**

Conocidas las características de las estructuras, se decidió construirlas para comprobar mediante medida los resultados obtenidos en las simulaciones.

El medio Left-Handed se obtuvo como una estructura periódica finita formada con las celdas unitarias analizadas. Como se ha comentado, dichas celdas se basan en un substrato en



el cual se insertan Capacitively Loaded Strips (CLSs), o elementos con permitividad negativa, y Split Ring Resonators (SRRs), o elementos con permeabilidad negativa, para obtener el medio con índice de refracción negativo [7].

El medio LHM se construyó aplicando una técnica de capeado. El dieléctrico seleccionado para fabricar las capas fue el RT/Duroid 5880, y el cual posee muy bajas pérdidas y cuyos parámetros característicos son $\epsilon_r = 2.2$, factor de disipación $\tan \delta = 0.0009$, grosor 0.254 mm y una capa de cobre de 70 μm en ambas caras (a y b) del substrato.

Se utilizaron tres tipos diferentes de capas (1, 3 y 3) para crear el medio LHM, siendo necesarias dos capas de cada tipo para construir un periodo. El tipo 1 poseía dieléctrico en ambas caras (1_a y 1_b), el tipo 2 tenía dieléctrico en una cara (2_a) y CLS en la otra (2_b) y el tipo 3 tenía CLS en la cara 3_a y SRR en la 3_b . Apilando las capas siguiendo un patrón $1_a 1_b 2_a 2_b 3_a 3_b 3_b 3_a 2_b 2_a 1_b 1_a$, se formó la celda unidad. En la Figura 11 pueden observarse fotografías de algunas de las capas construidas.

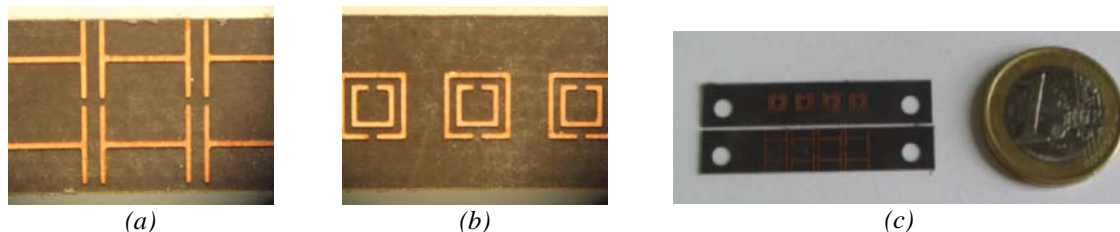


Figura 11. Ejemplo de las capas de la celda unidad. (a) Detalle tipo 3_a (b) Destalle tipo 3_b (c) Tipo 3

Construidas las estructuras, se procedió a medir su comportamiento. Puesto que las capas llegaron justo en el momento de la presentación del proyecto, no hubo tiempo de incluir estos resultados en la memoria. Dichas medidas fueron realizadas a posteriori como trabajo complementario al proyecto obteniendo unos resultados muy buenos, por lo que se incluyen aquí los principales resultados obtenidos y publicados.

- **Medida de la mejora de ganancia**

A continuación se muestra la mejora en la potencia recibida por una guía rectangular alimentada por otra guía rectangular cuando un medio left-handed se inserta entre ellas.

El medio LHM utilizado estaba compuesto por 12×4 periodos en la dirección transversal y un periodo en la dirección de propagación. Para excitar correctamente la estructura se necesita un campo E paralelo a los CLSs, o lo que es lo mismo, un campo H axial a los anillos. Dichas condiciones de polarización pueden obtenerse directamente en la apertura de una guíaonda rectangular.



Para medir la mejora de ganancia debida al medio LHM se usaron dos guíasondas rectangulares en banda X y un analizador de redes hasta 40 GHz (Agilent 8722 ES). El medio zurdo se insertó entre las dos guías y se rodeó de material absorbente para evitar posibles reflexiones. En cada caso, se midieron los parámetros S para una distancia fija desde el transmisor hasta la estructura zurda (d_1) y una distancia variable entre las guías (d). Dicho proceso se repitió para diferentes distancia d_1 . En la Figura 12 puede verse una representación del método seguido.

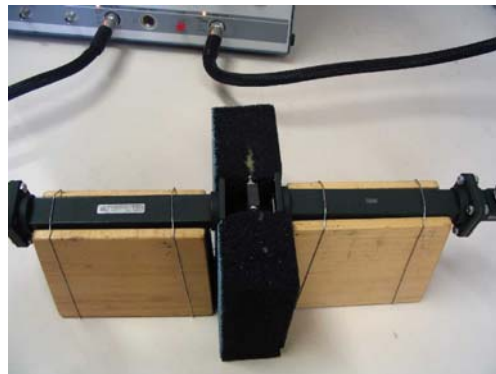


Figura 12. Configuración del método de medida de la mejora de la ganancia

Si definimos la ganancia como la mejora en el parámetro S_{21} cuando el medio zurdo está entre las guías con respecto al caso en el que no está y representamos dicha ganancia frente a la distancia d (ver Figura 13 a), se puede observar una ganancia media de unos 6.5 dB aproximadamente. Se obtuvo una forma sinusoidal con máximos de ganancia separados $\lambda_0/2$, siendo λ_0 la longitud de onda en el espacio libre. Debido a la desadaptación entre el aire y el medio zurdo, aparecen reflexiones en el metamaterial que crean una onda estacionaria de periodo $\lambda_0/2$.

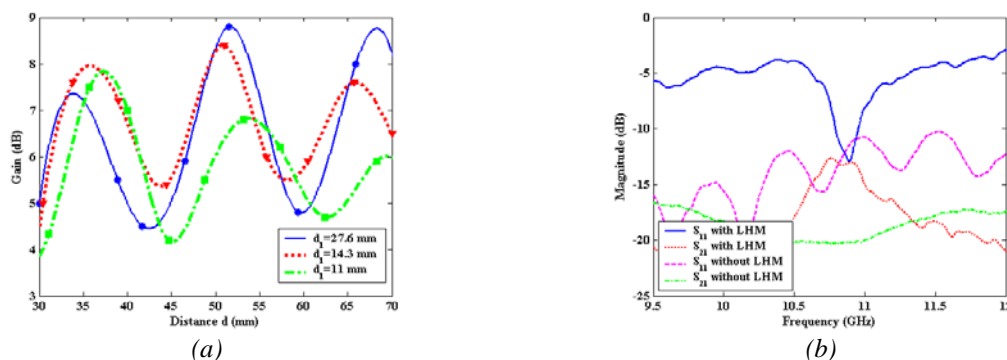


Figura 13. (a) Mejora de ganancia vs distancia para distintos valores de d_1
(b) Parámetros S para $d = 50.94$ mm y $d_1 = 27.6$ mm

En la Figura 13 b se muestran los parámetros S para el caso particular de una distancia entre guías $d = 50.94$ mm y una distancia al metamaterial $d_1 = 27.6$ mm. Comparando dicho



parámetros, puede observarse la influencia del superestrato en las características totales. Aparece un pico de resonancia debido al material left-handed a 10.89 GHz obteniéndose una ganancia de aproximadamente 8 dB a dicha frecuencia de resonancia.

IV. CONCLUSIONES

Por último se comentarán las principales conclusiones a las que se han llegado en este proyecto fin de carrera.

Como idea general se ha probado que la utilización de medios Left-Handed como superestratos o substratos de antenas dipolo mejora las características de radiación, produciendo un confinamiento de la potencia radiada, lo que se traduce en alta directivita, alta eficiencia y baja radiación trasera.

En cuanto a los materiales Left-Handed, se ha comprobado que posee dimensiones muy reducidas, inferiores a $\lambda/4$ y que su comportamiento puede entenderse como resonadores. Se ha comprobado que poseen propiedades paso banda y rechazo de banda y que permiten la escalabilidad así como la modificación de alguna de sus dimensiones para lograr la sintonización de la frecuencia de resonancia de los mismos.

Al combinar dichos materiales Left-Handed con antenas dipolo, se ha observado un confinamiento de la potencia radiada que produce una iluminación uniforme de toda la estructura aumentando así el área de radiación y por tanto la directividad. Además se ha comprobado que el efecto de las pérdidas es muy bajo, casi despreciable, por lo que se produce también un aumento de la eficiencia. Dada la absorción de la potencia por parte del superestrato, la radiación trasera se ve fuertemente disminuida.

Con respecto a los arrays de antenas, se ha comprobado que la eficiencia obtenida es muy elevada y que, sintonizando los dipolos a la frecuencia de resonancia del superestrato o del substrato, se puede elegir la dirección de radiación. Además, existe la posibilidad de crear arrays no uniformes, es decir, arrays multifrecuenciales pudiendo colocar las antenas radiantes muy juntas y con un bajo acoplo entre ellas.

Sin embargo, no todo son ventajas, sino que estos materiales left-handed poseen ciertos inconvenientes. Dado que se trata de elementos resonantes, poseen un ancho de banda reducido. Además, dadas sus reducidas dimensiones, pequeñas variaciones en frecuencia suponen grandes variaciones en fase, existiendo la posibilidad de sumar contribuciones en fase o en contrafase.



V. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Tal y como se ha comentado, el tema estudiado es muy novedoso, por lo que existen varias líneas futuras de investigación sobre las que trabajar. Así mismo, nuevos campos de aplicación van surgiendo conforme los diferentes grupos de investigación mundiales van trabajando con estos materiales, por lo que no se cierra la posibilidad de estudio de otras aplicaciones no mencionadas en este resumen.

- **Diseño y medida de arrays multifrecuenciales**

Dada la potencial aplicación de los arrays multifrecuenciales y los buenos resultados obtenidos en simulación, existe una gran tarea de investigación en este campo para lograr una estructura con aplicación práctica en los estándares comerciales actuales. Teniendo en cuenta este objetivo se ha solicitado la patente de dicha idea, siendo el título de la misma “Estructuras “left-handed” como superestratos y/o substratos de antenas planas”.

Como primer objetivo está la construcción y medida de los arrays para comprobar los resultados obtenidos con el simulador. Para ello, en primer lugar se debe diseñar, adaptar y construir la red de dipolos alimentadores. Una vez conseguido esto, se construirá el superestrato Left-Handed y se procederá a la medida. Puesto que el Grupo de Antenas de la Universidad Pública de Navarra cuenta con una cámara anecónica, se pretende medir el diagrama de radiación de la estructura para comprobar su correcto comportamiento.

- **Inversión de la Ley de Snell**

Por otro lado, se pretende comprobar la inversión de la Ley de Snell, debido al índice de refracción negativo de la estructura, introduciendo un array de dipolos en un medio LHM y aplicando un desfase entre ellos. Se debería observar una curvatura de los rayos contraria a la esperada. Esto ofrecería la posibilidad de scan dependiendo de si el medio se comporta como LHM o como RHM a la frecuencia de trabajo.

- **Combinación de PBG y LHM**

Actualmente está surgiendo un fuerte interés por las antenas basadas en tecnología plana. Ejemplo de este tipo de antenas son los parches y los dipolos, los cuales están siendo muy utilizados dado que se trata de una tecnología plana, fácil de construir y de bajo coste. Sin embargo, estas antenas planas tienen unas limitaciones de diseño como el reducido ancho de banda, baja ganancia y baja eficiencia debido a las pérdidas por ondas de superficies.



Miembros del Grupo de Antenas de la Universidad Pública de Navarra han demostrado que las características de este tipo de antenas se pueden mejorar colocando la antena sobre un substrato de tipo Photonic Band Gap (PBG), teniendo en cuenta que la frecuencia de resonancia de la antena debe de ser la misma que la del gap del PBG. Usando esta tecnología, el efecto de las ondas de superficie se elimina casi por completo.

Usando estos conocimientos, puede resultar interesante tratar de mezclar ambas tecnologías de PBG y LHM para conseguir sistemas radiantes con alta directividad, gran ancho de banda, alta eficiencia y baja radiación trasera.

- **WAAS**

Existen aplicaciones para las que no se requieren antenas con anchos de banda muy elevados, como es el caso de WAAS (Wide Area Augmentation System). Este sistema necesita una antena directiva (16-17 dB) pero con un ancho de banda reducido, la cual se embarcará en un satélite geoestacionario y será capaz de iluminar completamente la superficie de la Tierra. Combinando sistemas radiantes altamente eficientes, se pueden lograr las directividades requeridas reduciendo así el número de elementos necesario.

Hoy en día, se está en proceso de desarrollo, junto con la Agencia Espacial Europea (ESA), de la aplicación de este proyecto fin de carrera a WAAS.



REFERENCIAS

- [1] V.G. Veselago, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ”, *Sov. Phys. Usp.* 10, 509 (1968).
- [2] A. Erentok, P. L. Luljak, R. W. Ziolkowski, “Characterization of a Volumetric Metamaterial Realization of an Artificial Magnetic Conductor for Antenna Applications”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No. 1, January 2005.
- [3] R. W. Ziolkowski, “Design, Fabrication, and Testing of Double Negative Metamaterials”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 51, No. 7, July 2003.
- [4] E. Sáenz, R. Gonzalo, I. Ederra, P. de Maagt, “Metamaterials as Super-Substrate to Enhance Dipole Antenna Performances” 11th International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena, St. Petersburgo (Rusia) Junio 2004.
- [5] E. Sáenz, R. Gonzalo, I. Ederra, P. de Maagt, “Dipolos y Metamateriales: Mejora de las Características de Radiación” XIX Symposium Nacional URSI 04, Barcelona (España) Septiembre 2004.
- [6] E. Sáenz, R. Gonzalo, I. Ederra, P. de Maagt, “Radiation Performances of a Dipole Array Configuration Inserted in a Left-Handed Media” IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, Marina Mandarin (Singapore) Marzo 2005
- [7] E. Sáenz, R. Gonzalo, I. Ederra, P. De Maagt, “High Efficient Dipole Antennas by Using Left-Handed Superstrates”, 13th International Symposium on Antennas JINA 2004.