



METAMATERIALES EN MICROONDAS Y ANTENAS

J. M. González-Arbesú, E. Úbeda y J. Romeu

Universitat Politècnica de Catalunya, Campus
Nord, Mòdul D3, tlf: (34) 934016849

jmgonzalez@tsc.upc.es, uheda@tsc.upc.es,
romeu@tsc.upc.es

Abstract - Desde la década de los '80 una gran variedad de materiales artificiales (no existentes en la naturaleza) son intensivamente estudiados por sus inusitadas y sorprendentes propiedades electromagnéticas (como partes reales de permitividad eléctrica y permeabilidad magnética efectivas negativas, refracciones anómalas, no causalidad e inversión del desplazamiento Doppler, entre otras). Las investigaciones realizadas en algunos de ellos han conducido ya a nuevos diseños de antenas. En otros, con propiedades aún más sorprendentes y controvertidas, las investigaciones se encuentran todavía en un estadio incipiente y tan sólo auguran prometedores desarrollos que revolucionarán el mundo de las microondas y las antenas.

En este artículo se describirá escuetamente la diversidad de materiales artificiales objeto de estudio en ingeniería de microondas y en antenas, algunas de sus propiedades (tanto las verificadas experimentalmente como las teóricas) y sus potenciales aplicaciones para la fabricación de dispositivos. También se describirán las actividades que se están desarrollando en este campo en el Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions de la Universitat Politècnica de Catalunya.

1. INTRODUCCIÓN

Desde los tiempos de G. Marconi metales y (aislantes) dieléctricos son los materiales que se vienen empleando en la fabricación de antenas, dispositivos de microondas y circuitos electrónicos. Dada su elevada conductividad eléctrica, la principal función que desarrollan los metales en este tipo de aplicaciones era la conducción y/o almacenamiento de cargas, mientras que los dieléctricos se empleaban inicialmente como elementos estructurales de soporte dada su baja conductividad. La diferencia en las conductividades de metales y dieléctricos se puede explicar sobre la base de la existencia de cargas que pueden moverse libremente en los primeros, mientras que en los segundos están *ligadas* admitiendo tan solo pequeños desplazamientos.

Para el ingeniero-diseñador de dispositivos de microondas y antenas, la conductividad eléctrica s es el parámetro físico de mayor interés al trabajar con metales. La permitividad eléctrica relativa ϵ_r , la permeabilidad magnética relativa m_r , las tangentes de pérdidas eléctricas $tg d_e$ y magnéticas $tg d_m$

y la conductividad son los parámetros requeridos para la realización de un diseño en el que se empleen dieléctricos. Evidentemente, otros parámetros son también de importancia en el momento de realizar un diseño, como por ejemplo el espesor de los metales.

Tanto permitividad como permeabilidad relativas lo son respecto a los valores del vacío, y son representadas por números complejos. Los dieléctricos podrían clasificarse atendiendo al signo de las partes reales de su permitividad y permeabilidad efectivas, tal y como se representa en el sistema de coordenadas de la figura 1. Los materiales dieléctricos convencionales, existentes en la naturaleza, empleados en las tecnologías de las comunicaciones se sitúan en el primer cuadrante. Estos materiales se caracterizan por poseer valores positivos de la parte real de permitividad eléctrica y permeabilidad magnética, y se les conoce como materiales DPS (Double Positive) o RHM (Right-Handed Media), para los que la energía (definida a través del vector de Poynting, \mathbf{S}) se propaga en la misma dirección que las ondas electromagnéticas (definida por el vector número de onda \mathbf{k}). Estos materiales se caracterizan por tener un índice de refracción $n(\omega)$ positivo (aunque pueda ser complejo, su parte real es positiva).

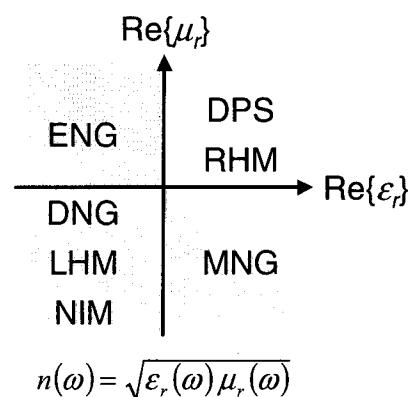


Figura 1. Mapa de los materiales dieléctricos clasificados según el signo de su permitividad y permeabilidad. El significado de las siglas se encuentra en el glosario, al final del artículo.

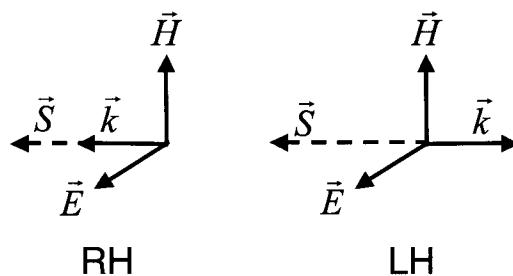
$$n(\omega) = \sqrt{\epsilon_r(\omega) \mu_r(\omega)} \quad (1)$$

No obstante, las propiedades de materiales complejos en los que la parte real de la permitividad y/o permeabilidad

pueden adquirir valores negativos se llevan estudiando desde los años '50 del pasado siglo y son objeto de un gran interés en la actualidad por muchos equipos de investigación, no tan solo por las aparentes peculiaridades de su comportamiento electromagnético sino también por las aplicaciones *tangibles* a las que puede dar lugar.

Así, ya han sido diseñados y fabricados materiales ENG (*Epsilon Negative*) y MNG (*Mu Negative*), pertenecientes al segundo y cuarto cuadrante, respectivamente, en los que tan sólo las partes reales de permitividad o permeabilidad pueden ser negativas (sólo una de ellas y no las dos simultáneamente). Las primeras experiencias con éxito en las que se ha conseguido fabricar un material MNG en una estrecha banda de frecuencia son muy recientes (año 1999).

Los materiales artificiales que en la actualidad son objeto de un estudio más *esforzado*, y provocadores de una gran controversia, son los pertenecientes al tercer cuadrante. Se caracterizan por poseer partes reales de permitividad y permeabilidad simultáneamente negativas, al menos en un estrecho margen de frecuencias, dando lugar a **índices de refracción negativos**. Por ello se les llama materiales DNG (*Double Negative*) o NIM (*Negative Index Media*). Adicionalmente estos materiales también son referidos como LHM (*Left-Handed Media*), pues en ellos **las ondas electromagnéticas se propagan en dirección contraria a la propagación de la energía**, tal como se representa en la figura 2.



$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu \vec{H}$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Figura 2. Medios RH y LH.

2. METAMATERIALES

Como hemos podido ver, los materiales comentados reciben diversos nombres en función de sus características, si bien algunos de ellos podrían englobarse bajo el epígrafe Metamateriales (MM). En definitiva, Metamateriales serían todos aquellos materiales artificiales que poseen propiedades novedosas y superiores a los materiales que pueden encontrarse en la naturaleza. Todos tienen en común la existencia de ciertas estructuras

periódicas o *celdas básicas* como constituyentes elementales. Atendiendo a esta periodicidad es usual realizar una clasificación de los materiales artificiales empleados en electromagnetismo en términos de sus dimensiones respecto a la longitud de onda. Así, cuando las celdas básicas son mucho menores que la longitud de onda podemos encontrarnos con materiales ENG, MNG o DNG, mientras que si las celdas básicas son del orden de la longitud de onda se habla de estructuras EBG (*Electromagnetic Band-Gap*). En este último caso, cuando el diseño corresponde a frecuencias ópticas se habla de estructuras PBG (*Photonic Band-Gap*).

A. Electromagnetic Band-Gap

Aunque en este artículo no trataremos en detalle sobre materiales EBG (ni PBG) cabe destacar la gran cantidad de aplicaciones sugeridas y llevadas a la práctica con estos materiales. Todas ellas se aprovechan del control que se tiene sobre las frecuencias y números de onda, siendo posible seleccionar las bandas de propagación y no propagación en el sustrato EBG (o PBG) a partir del control de las periodicidades (uni-, bi- o tridimensionales) de las estructuras en espacios que forman el material.

De esta forma, en el diseño de antenas planas, a partir de la realización de perforaciones (de dimensiones y disposiciones específicas) sobre un sustrato dieléctrico convencional, es posible la práctica supresión de las ondas de superficie que se desplazan por el sustrato, tal como se representa en la figura 3, y afectan a los diagramas de radiación y a la eficiencia de radiación. Este mismo diseño reduce los acoplamientos en el caso de agrupaciones formadas por antenas planas. No obstante, no es esta la única posibilidad para la realización de un sustrato EBG para antenas planas. Existen diseños en los que el sustrato está fabricado con postes (cilíndricos) de material dieléctrico de dimensiones y separaciones específicas, e incluso con geometrías «woodpile» (figura 4).

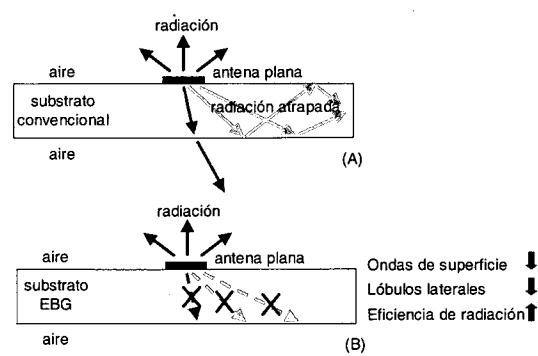


Figura 3. Sección de una antena plana convencional (A) y otra con substrato EBG 3-D (B). Se muestra la propagación de ondas en el interior del sustrato convencional y la práctica eliminación de la propagación en el interior del substrato EBG. Si las antenas fueran tipo parche el substrato EBG podría ser 2-D.

También están bien documentados los desarrollos de filtros, guías de onda, antenas de cavidad, antenas parabólicas y estructuras sintonizables con materiales EBG.

B. Double Negative Media

Los materiales DNG se caracterizan por los valores negativos de las partes reales de permitividad y permeabilidad, simultáneamente en la misma banda de frecuencias, originando valores también negativos para el índice de refracción.

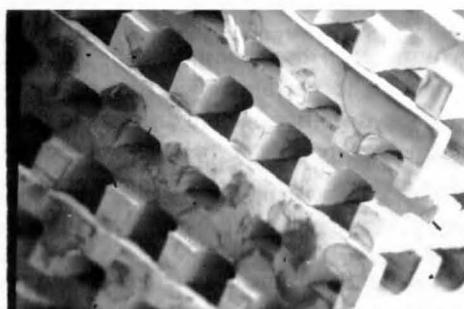


1-D EBG

2-D EBG

3-D EBG

(A)



(B)

Figura 4. (A) Configuraciones típicas de substratos EBG que reflejan la periodicidad en 1-D, 2-D y 3-D. (fuente: [11, T. Itoh]). (B) Substrato EBG en configuración «woodpile» (fuente: [3]).

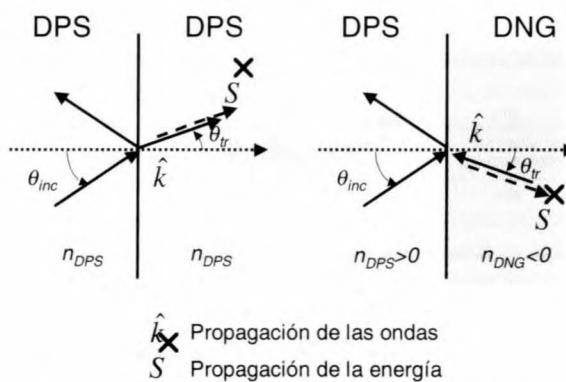
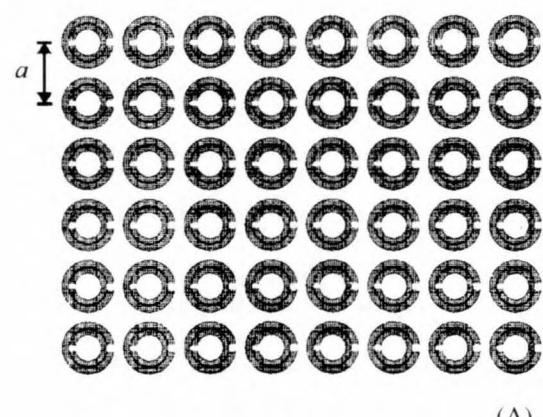


Figura 5. Inversión del ángulo de refracción en un medio DNG respecto a un medio DPS para una onda electromagnética continua.

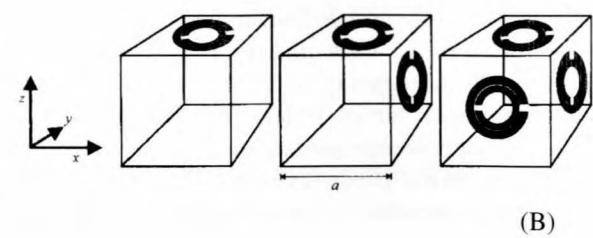
Las propiedades de estos materiales artificiales fueron estudiadas desde un punto de vista teórico por el físico

ruso Víctor Veselago, ya en 1967. Aunque algunos de sus resultados contienen errores, las principales propiedades de un material DNG son peculiares. Al poner en contacto un material DPS con un material DNG, las ondas continuas que se estuvieran propagando desde el material DPS presentan un ángulo de refracción *anómalo* (de signo opuesto al que tendrían en otros materiales DPS convencionales). Esta anomalía sólo se observa para ondas continuas, no para ondas moduladas (las que transportan información), como puntualiza P. Valanju, de la University of Texas. También es peculiar la inversión del efecto Doppler en el interior de un material DNG, donde las ondas transmitidas desde una fuente sufren una reducción en su frecuencia cuando son observadas por un receptor al que la fuente se aproxima. Lamentablemente estas (y otras) propiedades no pudieron ser demostradas en 1967 debido a la inexistencia de materiales DNG.

No fue hasta el año 1999 cuando Pendry y sus colaboradores, del Imperial College in London, fueron capaces de diseñar un material con una elevada permeabilidad magnética efectiva negativa en un reducido margen de frecuencias a partir de la agrupación periódica de conductores magnéticos (figura 6). A frecuencias inferiores a la de resonancia el comportamiento del material posee una permeabilidad efectiva positiva, y sobre la resonancia una permeabilidad efectiva negativa. El interés de este tipo de estructura radica en la posibilidad de diseñar materiales DNG o NIM a partir de su combinación con materiales con permitividades efectivas negativas (en el mismo margen frecuencial). Estos materiales ya habían sido fabricados con tiras metálicas, presentando un comportamiento equivalente a una permitividad efectiva negativa en una pequeña región del espectro. En la figura 7 se muestran pantallas con estas características.



(A)



(B)

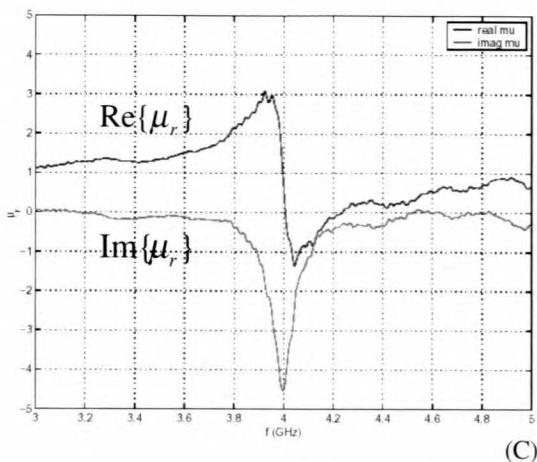
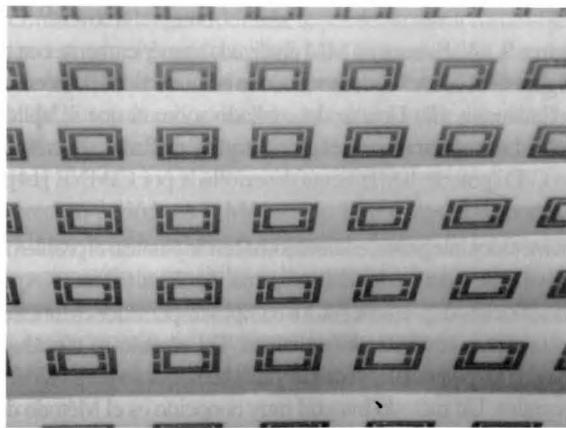


Figura 6. (A) Pantalla MNG formada con SRR (Split Ring Resonators): posee una permeabilidad efectiva negativa sobre la frecuencia de resonancia, aunque presenta un comportamiento anisotrópico (varía con la dirección de llegada de las ondas electromagnéticas) (fuente: [2]). (B) Añadiendo simetrías 3-D a las celdas básicas se consigue incrementar la isotropía del conjunto (fuente: [2]). (C) Partes real e imaginaria de la permeabilidad magnética efectiva de una pantalla de SRR como la de la figura 7, diseñada en la Universidad Politécnica de Cataluña.



(A)



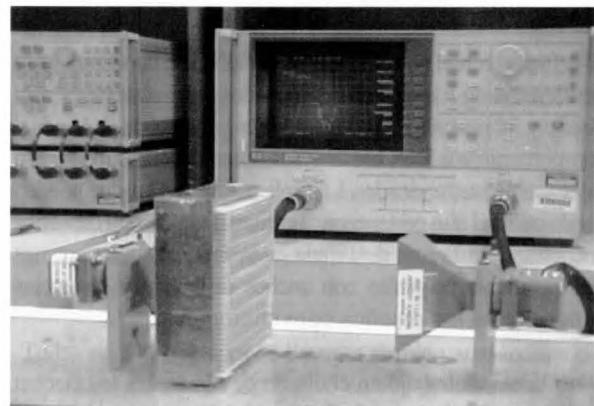
(B)

Figura 7. Ejemplo de pantallas ENG (A) y MNG (B), diseñadas en la Universitat Politécnica de Catalunya (fotografías: J. Giner).

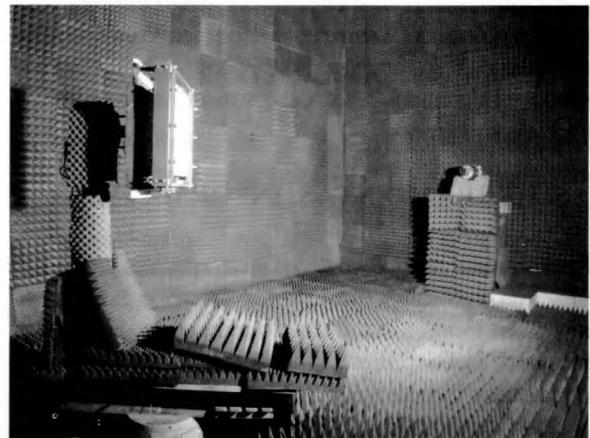
La aparición de material MNG rápidamente (en el año 2000) condujo a la fabricación de la primera estructura DNG por el grupo de D. Smith en la Universidad de California en San Diego.

3. CARACTERIZACIÓN DE METAMATERIALES DNG

La caracterización de materiales DNG requiere la utilización de medidas electromagnéticas en reflexión y en transmisión. El material en estudio se sitúa (dependiendo de su tamaño físico y de la frecuencia de trabajo) en una guía de ondas o en el interior de una cámara anechoica (figura 8). Empleando un analizador de redes vectorial se determinan los parámetros S11 y S21 en intensidad y fase -es decir, los campos reflejados y transmitidos por el material con relación a los campos incidentes- de la muestra de material en un ancho de banda que incluya la región donde se encuentra la resonancia del material. Con estos datos, y conocido el espesor de la muestra, es posible resolver el sistema de ecuaciones que relaciona los parámetros S de la muestra de material con su permitividad $\epsilon_{eff}(w)$ y permeabilidad efectiva $\mu_{eff}(w)$ en la banda frecuencial de trabajo.



(A)



(B)

Figura 8. (A) Caracterización de pequeñas pantallas MM en laboratorio (fuente: [11, R. W. Ziolkowski]). (B) Caracterización de pantallas DNG en la cámara anechoica de la Universitat Politécnica de Catalunya (fotografía: J. Giner).

Empleando este método se han realizado medidas experimentales que certifican la existencia de regiones en las que ciertos materiales se comportan de forma equivalente a pantallas con permitividad efectiva negativa, y otros materiales con comportamientos equivalentes a pantallas con permeabilidades efectivas negativas. Asimismo, y mediante la combinación de ambas, se ha comprobado (aunque con persistentes reticencias por parte de algunos investigadores) la existencia de estructuras con comportamientos equivalentes a materiales DNG en una banda de frecuencias reducida y con una incidencia electromagnética normal a las pantallas.

4. EXPECTATIVAS

La utilización de estructuras EBG en antenas y microondas es una realidad pues una pléyade de dispositivos han sido ya fabricados, revelando excepcionales características en los diferentes aspectos técnicos en los que han sido evaluados. Las reducciones de tamaño y peso con respecto a diseños más convencionales son notables, aunque por contra suelen requerir procesos de fabricación más complejos. Así, se han fabricado prototipos de, entre otros dispositivos, antenas de tipo parche, acopladores, filtros pasa banda con bandas pasantes espurias de menor intensidad que con diseños convencionales, guías rectangulares TEM, e incluso conductores magnéticos artificiales.

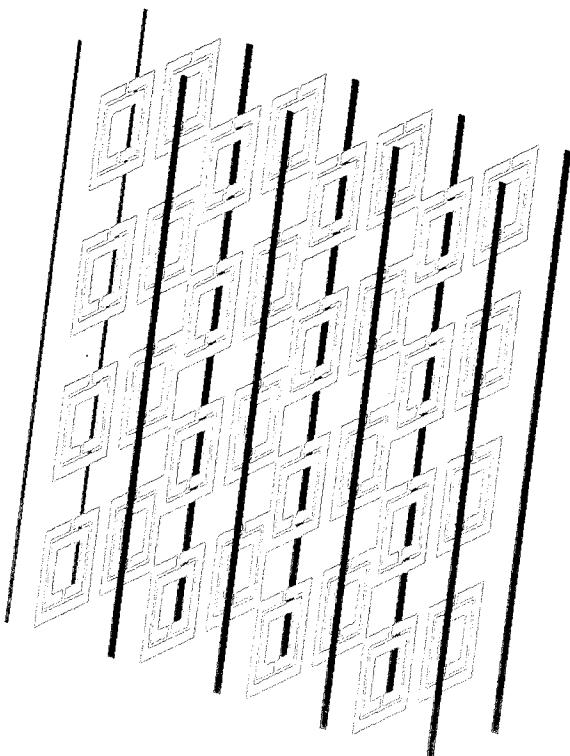
El esfuerzo actual en el campo de los DNG se concentra en la verificación de los efectos demostrados teóricamente y en el diseño y fabricación de metamateriales con anchos de banda y comportamientos DNG en ángulos de incidencias superiores a los actualmente fabricados. Las aplicaciones en las que pueden ser de utilidad aún pertenecen al campo de la ficción científica encontrándose la más destacada en la fabricación de antenas eléctricamente pequeñas con anchos de banda y ganancias superiores a los diseños convencionales.

Otras líneas de trabajo en el diseño de materiales se orientan hacia la creación de materiales DPS artificiales con permitividades y permeabilidades *a medida*. Para ello se combinan adecuadamente materiales con permitividades y permeabilidades existentes y conocidas. Los materiales a emplear y su disposición es determinada, típicamente, mediante algoritmos de optimización (basados en algoritmos genéticos) que requieren de un intenso esfuerzo computacional.

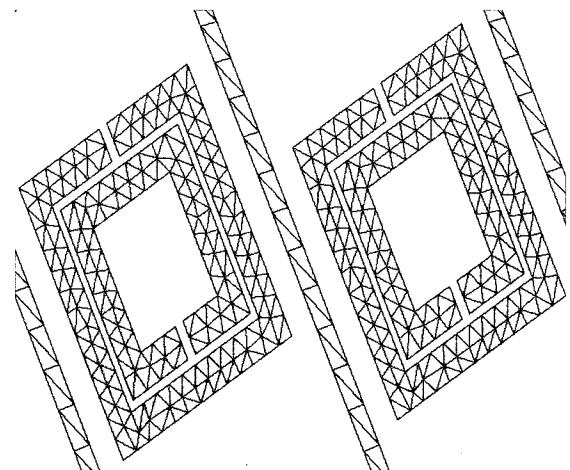
5. HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS

El análisis electromagnético de los metamateriales pasa por el mallado de la geometría (figura 9) y la aplicación de alguna de las variadas técnicas numéricas existentes. Las dos familias generales de análisis para este tipo de problemas son los métodos diferenciales o bien los métodos integrales.

Los métodos diferenciales nacen de aproximar las derivadas presentes en las ecuaciones de Maxwell por diferencias finitas en el espacio y en el tiempo. Sin duda, el método diferencial más usado es FDTD (*Finite Differences in Time Domain*), que es el método adecuado para analizar el efecto del objeto bajo la incidencia de pulsos modulados a una cierta frecuencia.



(A)



(B)

Figura 9. (A) Estructura MM analizada numéricamente con el programa FIESTA 3-D desarrollado en la Universidad Politécnica de Catalunya. (B) Detalle del mallado sobre el que se aplica MoM. Las representaciones gráficas y los mallados se realizan con GiD (potente herramienta desarrollada por CIMNE [14]).

Los métodos integrales, en cambio, nacen de plantear el problema equivalente -derivado del teorema de Equivalencia- que desemboca en expresiones de los campos dispersados en función de corrientes equivalentes radiantes. Tal vínculo se efectúa a través de los potenciales vectores y escalares, que son expresiones integrales. Un método integral muy conocido es el Método de Momentos (MoM), el cual se basa en aplicar las condiciones de contorno en la superficie de los objetos mediante el uso de unas funciones base. Normalmente, tales funciones base pueden ser funciones tejido (de sumo interés para la discretización de

estructuras planas y regulares) o bien funciones triángulos (adecuadas para el mallado de una superficie arbitraria) [17].

La elección del uso de FDTD o de MoM depende del problema a analizar. FDTD es adecuado para la obtención de respuestas transitorias o bien para conocer la respuesta bajo la incidencia de un pulso modulado en frecuencia. MoM es una herramienta válida para el análisis a una sola frecuencia y en régimen permanente sinusoidal.

Los métodos numéricos eventualmente requieren de una notable carga computacional en el uso de la CPU y en espacio de memoria. FDTD requiere de operaciones muy básicas (sumas y diferencias) relacionando puntos cercanos físicamente. Comoquiera que hay que procesar un número muy elevado de puntos -especialmente en problemas abiertos- hay que resolver matrices muy dispersas y muy grandes. Para mejorar sus prestaciones es adecuado el uso de muchos procesadores trabajando en paralelo.

MoM requiere la inversión de matrices llenas, que representan todas las interacciones mutuas entre funciones base. Para la mejora de sus prestaciones, es por tanto crítica la aceleración del método de inversión. Básicamente, existen dos grandes técnicas para acelerar los algoritmos iterativos de inversión aplicados a las matrices de MoM. Por un lado, el uso de técnicas de precondicionado; es decir, pre- o post-multiplicar el sistema por una matriz mejor condicionada -y relacionada con la matriz de MoM original- de manera que el número de iteraciones total para converger disminuya drásticamente. Por otro lado, especialmente para problemas con dimensiones eléctricas suficientemente grandes, el cálculo de las interacciones entre funciones base suficientemente alejadas mediante el desarrollo analítico en ondas planas, lo cual supone una disminución en el tiempo de cálculo. Ejemplos de tales técnicas son las técnicas basadas en multipolos como el *MultiLevel Fast Multipole Method (MLFMM)* [18].

Para el caso concreto de metamateriales, tales herramientas de análisis numérico -en general farragosas y con apreciable carga computacional- pueden ser simplificadas. A saber, dado que los metamateriales son objetos con variación periódica y grandes en términos de la longitud de onda, se pueden analizar como objetos con estructura periódica e infinitos. Esta asunción simplifica sobremanera el análisis numérico ya sea con FDTD que con MoM. En efecto, ahora la carga computacional reside solamente en el mallado en una de las células de periodicidad. Sin embargo, estas formulaciones -en concreto, FDTD con condiciones de contorno periódicas y Método de Momentos con modos de Floquet- no son realistas pues ignoran el efecto de los bordes de la agrupación y son útiles solamente bajo incidencia de onda plana. Sirven en todo caso para efectuar una primera aproximación a la descripción del problema y para permitir sopesar si es conveniente el posterior análisis riguroso con FDTD o MoM.

6. CONCLUSIONES

La capacidad de sintetizar materiales con las partes reales de permitividad y/o permeabilidad negativas es un campo de

investigación en el que se están invirtiendo grandes recursos dadas las potenciales aplicaciones en el mundo de las comunicaciones. El diseño de nuevos dispositivos de microondas y la fabricación de antenas con mejores prestaciones y un tamaño más reducido son algunas de las aplicaciones más inmediatas.

El esfuerzo actual en este campo está particularmente concentrado la verificación experimental de los comportamientos DNG observados en algunos materiales (y teóricamente demostradas, aunque centro de una gran controversia en la comunidad científica). Así mismo, la fabricación de materiales con comportamientos DNG en anchos de banda mayores que los actuales y en ángulos de incidencia diferentes del normal son también objeto de estudio.

En la actualidad, miembros del Departament de Teoria de la Senyal i Comunicacions de la Universitat Politècnica de Catalunya están involucrados en un proyecto coordinado con la Universitat Autònoma de Barcelona y con la Universidad Pública de Navarra para el diseño y caracterización de este tipo de materiales. El proyecto pretende no tan solo el desarrollo de herramientas de cálculo informáticas adaptadas a la resolución de problemas electromagnéticos sobre estructuras periódicas, sino también el diseño y fabricación de estructuras MM multibanda. Así mismo se pretende evaluar el potencial real de los materiales DNG para su utilización en el diseño de antenas.

En la actualidad, en el Departamento se está desarrollando una herramienta software propia llamada *FIESTA 3-D (Fast Integral Equation Solver for scatterers and Antennas in 3-D)* que permite el análisis de estructuras metamateriales empleando el método de los momentos. Esta herramienta es capaz de analizar geometrías con un elevado número de incógnitas empleando un ordenador personal.

Todas estas actividades se llevan a término aprovechando la capacidad de cálculo disponible en el Departamento, y a la disponibilidad de laboratorios de radiofrecuencia y de una cámara anechoica de grandes dimensiones que permiten la caracterización electromagnética precisa de antenas y materiales.

GLOSARIO

A continuación figuran, por orden alfabético, algunas de las siglas comúnmente empleadas en la terminología de esta especialidad. No todas ellos han sido referenciadas en el presente texto.

AMC: *Artificial Magnetic Conductor*;

BW: *Backward Wave*;

DNG: *Double Negative*;

DPS: *Double Positive*;

EBG: *Electromagnetic Band-Gap*;

ENG: *Epsilon Negative*;

FDTD: *Finite Differences in Time Domain*

FSS: *Frequency Selective Surface*;

FW: *Forward Wave*;

LHM: *Left-Handed Medium*;

MLFMM: *MultiLevel Fast Multipole Method*;



MM: *MetaMaterial*;
 MoM: *Method of Moments*;
 MNG: *Mu NeGative*;
 NIM: *Negative Index Medium* (medio con índice de refracción negativo);
 PBG: *Photonic Band-Gap*;
 PIM: *Positive Index Medium* (medio con índice de refracción positivo);
 RHM: *Right-Handed Medium*;
 SNG: *Single NeGative*;
 SRR: *Split Ring Resonator*.

REFERENCIAS

- [1] V.G. Veselago: «The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ », *Soviet Physics Uspekhi*, Jan.-Feb. 1968, **10**, (4), pp. 509-514.
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart: «Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena», *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, **47**, (11), Nov. 1999, pp. 2075-2084.
- [3] R. Gonzalo, «Study of photonic crystal structures and their application in the field of antennas.» Ph.D. dissertation, Dept. Electric and Electronic Eng., Public Univ. of Navarra, Pamplona, Spain, 2000.
- [4] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, S. Schultz: «Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity», *Physical Review Letters*, May 2000, **84**, (18), pp. 4184-4187.
- [5] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz: «Experimental verification of a negative index of refraction», *Science*, 6 Apr. 2001, **292**, pp. 77-79.
- [6] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. C. Nemat-Nasser, S. Schultz: «Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial», *Applied Physics Letters*, Jan. 2001, **78**, (4), pp. 489-491
- [7] Y. Rahmat-Samii, H. Mossallaei: «Electromagnetic band-gap structures: classification, characterization, and applications», *11th International Conference on Antennas and Propagation*, 17-20 April 2001, pp. 560-564.
- [8] N. García, M. Nieto-Vesperinas: «Is there an experimental verification of a negative index of refraction yet?», *Optics Letters*, June 2002, **27**, (11), pp. 885-887.
- [9] R. W. Ziolkowski: «Double negative metamaterial design, experiments, and applications», *IEEE Antennas Propagat. Society Int. Sym.*, 2002, **2**, pp. 396-399.
- [10] P. Gay-Balmaz, O. J. F. Martin: «Efficient isotropic magnetic resonators», *Applied Physics Letters*, July 2002, **81**, (5), pp. 939-941.
- [11] Lecture notes of 2nd International PhD School on selected topics in applied electromagnetics «Metamaterials and RF microelectromechanical systems», Villa Umbra, Perugia (Italy), Sept. 2003. Prof.: T. Itoh, N. Engheta, R. W. Ziolkowski, A. M. Ionescu, T. Liseck, L. Vietzorrec, L. Buchaillet, P. Blondy, and R. Plana.
- [12] E. Úbeda, A. Heldring, J. Parrón, J. Romeu, J. M. Rius: «Numerical analysis of composite finite arrays of split ring resonators and thin strips», *IEEE Antennas Propagat. Society Int. Symp.*, 2003, **3**, pp. 500-503.

- [13] E. Úbeda, A. Heldring, J. Parrón, J. Romeu, J. M. Rius: «Radiation pattern of composite finite arrays of conducting elements with an exciting elementary dipole», *IEEE Antennas Propagat. Society Int. Symp.*, 2003, **3**, pp. 379-382.
- [14] Sobre GiD (interface de modelado gráfico): <http://gid.cimne.upc.es/>
- [15] R. W. Ziolkowski, «Double Negative Metamaterial: Physics, design, and experiments», <http://online.kitp.ucsb.edu/online/q02/ziolkowski/>
- [16] P. Valanju, «Left Handed Media (LHM) Righted», <http://www.utexas.edu/research/cemd/nim/Intro.html>
- [17] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson: «Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape», *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **30**, May 1982, pp. 409-418.
- [18] R. Coifman, V. Rohklin, and S. Wandzura: «The fast multipole method for the wave equation: a pedestrian description», *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, **35**, pp. 7-12, 1993.

AUTORES



José María González, Ingeniero de Telecomunicación y Doctor Ingeniero de Telecomunicación por la UPC, ha desempeñado diversos puestos técnicos en empresas del sector de las telecomunicaciones y ha sido profesor en la Universidad de Zaragoza. En la actualidad es investigador contratado a través del Programa Ramón y Cajal del Ministerio de Ciencia y Tecnología en su convocatoria de 2001. Su actividad investigadora y docente se desarrolla en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la UPC. Sus principales temas de trabajo son el análisis, diseño y caracterización de antenas en sistemas de medidas convencionales y a través de termografías infrarrojas.



Eduard Úbeda, es investigador Ramón Cajal en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones (UPC). Tiene experiencia investigadora en el Joint Research Center, en Ispra, Italia, centro dependiente de la Unión Europea, en los años 1996 y 1999. En los años 2002 y 2003 trabajó como Visiting researcher en el Electromagnetic and Communication Lab de Pennsylvania State University (PSU). Sus áreas de interés principales son la computación numérica de dispersión y radiación electromagnética usando ecuaciones integrales.



Jordi Romeu, Ingeniero de Telecomunicación y Doctor Ingeniero de Telecomunicación por la UPC. Es Catedrático del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones y profesor en la ETSETB. Sus líneas de investigación son el análisis, diseño y medida de antenas. Por sus trabajos de investigación ha recibido el Gran Premio IST otorgado por la Comisión Europea, el premio Ciutat de Barcelona y la Distinción de la Generalitat para la Promoción de la Investigación. Es coautor de más de 30 artículos en revistas internacionales y del libro *Antenas*.