

# Abstract

With this thesis "*Application of metamaterial structures in the design, analysis and prototyping of planar antennas*", we want to continue with the line of investigation of planar antennas where the Radiation Group from the Technical University of Madrid has broad experience. The experience acquired with the design and analysis of planar antennas in the Radiation Group, along with the newness and the interest that arouses the novel artificial periodic structures called metamaterials allow us to open a field of possibilities for improving planar antenna performances that will be explored with this work. It is possible to be said that the field of the metamaterials applied to the planar antennas is still in a period of investigation and expansion, where novel contributions can be made. Starting off this base, the fundamental idea that has been achieved with the work that has been made, is centering on studying the potential application of these novel structures to the design of planar antennas. In order to carry out the development of the present doctoral thesis, it has been tried to achieve a series of landmarks that are enumerated as follow emphasizing the contributions that were obtained with this work.

First, a previous deep revision work of current state of the art has been made giving a general vision on the metamaterials used in this thesis and of the different applications from these structures to the field of the planar antennas.

Secondly, the effect of AMC structures in parallel-plate slot antennas at 12 GHz band has been analyzed, placed as sidewalls instead of the conventional metallic walls and as propagation strips within the oversized waveguide. These concepts are illustrated in the thesis by two possible applications analyzed in detail and validated experimentally. The sidewalls with AMC structures allow to get uniform field distribution and aperture illumination in the parallel-plate waveguide avoiding an abrupt decline of the field along the propagation direction. The propagation strips (AMC alternates with PEC) for monomode waveguides allow to guide efficiently the wave propagation of the different virtual rectangular waveguide in the oversized waveguide forcing the propagation in one direction and avoiding undesired mutual coupling between them, being able to generate a virtual short circuit that delimits the  $TE_{10}$  adjacent individual modes propagation. They have been called virtual propagation waveguides because there are no physical walls between each one. The obtained results are presented based in terms of field distribution for the wave propagation and in terms of aperture efficiency and directivity for the radiation character-

istics of these antennas to evaluate the aperture illumination of the slots. These structures allow to control, guide and enhance the wave propagation and radiation performances of these kinds of antennas. The viability and advantages that offer these structures in these antennas have been analyzed. These structures represent a first promising step towards obtaining parallel-plate slot antennas with high efficiency and directivity.

Thirdly, a feeding concept for TEM wave excitation in parallel-plate slot antennas using a planar left-handed lens excited via a coaxial probe has been proposed. This feed allows to reduce the undesired effects of ripples and losses in the quasi-TEM mode due to the present excitation forms (N elements of excitation that generate the feeding) of the parallel-plate slot antennas to enhance the uniform field distribution within the oversized guiding waveguide. The design, analysis and characterization of this method of excitation in the 7.5 GHz band for a first prototype and in the 12 GHz frequency band for a second prototype have been presented. The simulated results show that the functioning of the ideal left-handed lens wavefront propagates a uniform plane wave inside the oversized guiding waveguide. In addition, the parametric study of the unit cell in terms of dispersion diagram for the design of the real left-handed lens implemented with mushroom structures show proper functioning results as a left-handed medium. Although the mushroom structures have manufacturing constraints, the results are very promising for use as a left-handed medium in a way of feeding TEM mode in these antennas. The simulations show that the uniformity of the field distribution within the waveguide is quite good. The results are very promising as excitation form of TEM mode for parallel-plate slot antennas. The use of these structures in this kind of antennas supposes a newness with respect to traditional feeding structures.

In fourth place, an artificial substrate with magneto-dielectric properties for planar microstrip antennas has been presented. The fundamental properties of microstrip patch antennas on a magneto-dielectric substrate have been studied. An analysis and characterization of the substrate based on its electrical and magnetic parameters including the losses have been realized. The microstrip transmission line method for the extraction of its constitutive parameters has been used. The application of a microstrip patch antenna at 1.9 GHz on this substrate in function of the patch size, its bandwidth, its radiation efficiency and its directivity has been analyzed. Its operation has been studied by means of different simulations that have experimentally been validated. This substrate allows to reduce the size of planar microstrip antennas obtaining some improvement in

its performances conserving its radiation characteristics.

In fifth place, different oblong cross-sectional shapes of hard cylinders to reduce the electromagnetic blockage caused by metal struts or masts supporting the feed in reflector-arrays or reflector antennas to achieve invisibility have been analyzed in terms of equivalent blockage width and compared over a large frequency band (0-20 GHz) to evaluate their performances (to find out how thick a strut can be and still be quite invisible) for TE polarization. The drawbacks and advantages of these different blocking objects have been highlighted. Also, different implementations of hard surfaces on the strut design for TM polarization with artificial surfaces and how they perform as a function of their design parameters, to reduce these obstructions and blockage effects for such cases where the direction of the incident wave is known, have been investigated and proposed. In particular, dielectric coating and strips have been used to create hard surfaces. Parameters such as the strip period or the cross section length are critical for the performance. Both factors, shape and realization of the hard surface for the struts are fundamental to reduce blockage. The analysis of this work has been done with normal incidence and oblique incidence in the azimuth plane on infinitely long struts. Solutions which reduce blockage simultaneously for TE and TM cases have been analyzed and proposed with very low blockage within a narrow frequency band.

Therefore, the main objective of this doctoral thesis allows to extend the knowledge of the analysis, design and operation of metamaterial structures to contribute and propose possible solutions that help to improve the planar antenna performances using these novel structures.



# Resumen

Con esta tesis "*Aplicación de estructuras metamateriales en el diseño, análisis y prototipado de antenas planas*" se pretende continuar con la línea de investigación sobre antenas planas, en la que el Grupo de Radiación de la Universidad Politécnica de Madrid tiene amplia experiencia. La experiencia adquirida en el diseño y análisis de antenas planas en el Grupo de Radiación, junto con la novedad y el interés que suscitan las nuevas estructuras periódicas artificiales llamadas metamateriales, permite abrir un campo de posibilidades en la mejora de las prestaciones de las antenas planas que se pretenden explorar con este trabajo. Se puede decir que el campo de los metamateriales aplicado a las antenas planas está aun en un período de investigación y de expansión donde se pueden realizar novedosas aportaciones. Partiendo de esta base, la idea fundamental que se ha perseguido con el trabajo que se ha realizado se centra en estudiar la potencial aplicación de estas novedosas estructuras a diseños de antenas planas, en línea con los intereses de investigación del Grupo de Radiación. Para llevar a cabo el desarrollo de la presente tesis doctoral se han seguido una serie de hitos que a continuación se enumeran, remarcando las aportaciones que se han logrado con este trabajo.

En primer lugar, se ha realizado un profundo estudio bibliográfico dando una visión general sobre los metamateriales utilizados en esta tesis y de las diferentes aplicaciones de estas estructuras al campo de las antenas planas.

En segundo lugar, se ha analizado el efecto de estructuras conductoras magnéticas artificiales (AMC) en antenas de ranuras en guía de placas paralelas en la banda de 12 GHz, tanto como sustitución de las paredes laterales como estructura de guiado en la guía de placas paralelas. Estos conceptos se ilustran en la tesis mediante dos posibles aplicaciones analizadas en detalle y validadas experimentalmente. Las paredes laterales con AMC permiten uniformizar la distribución de campo en el interior de la guía evitando la abrupta caída de campo en sus bordes. Las estructuras de guiado (AMC alternados con PEC) permiten marcar de manera eficiente el camino de propagación de ondas electromagnéticas de las distintas guías virtuales en la guía biplaca, forzando su propagación en una sola dirección y evitando efectos de acoplamiento indeseados entre ellas. Con ello se consigue generar un cortocircuito virtual que delimita perfectamente los modos  $TE_{10}$  adyacentes individuales. Se han denominado guías virtuales porque no tienen paredes físicas entre cada guía monomodo. Los resultados obtenidos son presentados en función

de la distribución de campo para la propagación de onda, y en función de la eficiencia de apertura y de la directividad para las características de radiación de estas antenas. Se ha demostrado que permiten controlar, guiar y mejorar las características de propagación de ondas electromagnéticas y de radiación en este tipo de antenas, en particular el control de la excitación de las ranuras. Se ha analizado la viabilidad y las ventajas que ofrecen estas estructuras para este tipo de antenas. Estas estructuras representan un primer paso prometedor hacia la obtención de antenas planas de ranuras en guía biplaca con alta eficiencia y directividad.

En tercer lugar, se ha propuesto una forma de excitación de las antenas planas de array de ranuras en guía de placas paralelas siguiendo la metodología tradicional de generación de un modo TEM en la apertura de la guía biplaca, utilizando una lente plana con estructuras en forma de seta como medio zurdo excitada por sonda coaxial. Con esta forma de alimentación se trata de reducir los efectos indeseados de rizado y pérdidas debido a las formas de excitación actuales ( $N$  elementos que actúan como excitadores que generan la alimentación) de las antenas planas de placas paralelas. Se ha presentado el diseño, análisis y caracterización de este método de excitación en la banda de 7.5 GHz para un primer prototipo y en la banda de 12 GHz para un segundo prototipo. Los resultados de simulación obtenidos muestran que el funcionamiento de la lente zurda ideal propaga un frente de onda plano uniforme en el interior de la guía de ondas de placas paralelas. Además, los resultados del estudio paramétrico de la celda unidad mediante el diagrama de dispersión para el diseño de la lente zurda real con estructuras en forma de seta muestran un buen funcionamiento de la estructura como medio zurdo. Aunque la estructura en forma de seta como medio zurdo tenga limitaciones de fabricación, los resultados obtenidos en el caso de la lente zurda ideal simulada con medios homogéneos y los diagramas de dispersión de la lente zurda real son muy prometedores como nueva forma de alimentación del modo TEM en estas antenas. Las simulaciones del caso ideal muestran que se puede conseguir una mejoría en la uniformidad de la distribución de campo en el interior de la guía biplaca, aumentando de esa manera la apertura de iluminación de las ranuras. La principal ventaja de utilizar esta forma de excitación en la guía biplaca, siguiendo la metodología tradicional de generación de un modo TEM en la apertura de la guía, es la reducción de los efectos indeseados de rizado y pérdidas debido a la forma de excitar el frente de onda plano y de conseguir mayor uniformidad en la distribución de campo en la apertura de la guía. De esta manera se obtienen mejores prestaciones de las

antenas de placas paralelas. La utilización de estas estructuras en este tipo de antenas supone una novedad con respecto a estructuras de alimentación tradicionales.

En cuarto lugar, se ha presentado un sustrato artificial con propiedades magneto-dieléctricas para las antenas planas microstrip. Se han estudiado las propiedades fundamentales de un parche microstrip sobre un sustrato magneto-dieléctrico. Se ha realizado un análisis y caracterización del sustrato en función de sus parámetros eléctricos y magnéticos incluyendo las pérdidas. Se ha utilizado el método de línea de transmisión microstrip para la extracción de sus parámetros constitutivos. Se ha analizado la aplicación de un parche microstrip a 1.9 GHz sobre este sustrato en función del tamaño del parche, de su ancho de banda, su eficiencia de radiación y su directividad. Se ha estudiado su funcionamiento mediante distintas simulaciones que han sido experimentalmente validadas. Este sustrato permite reducir el tamaño de antenas planas microstrip consiguiendo alguna mejora en sus prestaciones conservando sus características de radiación.

En quinto lugar, se han analizado diferentes formas de soportes cilíndricos con condiciones "hard" para reducir el problema de la obstrucción y bloqueo de ondas electromagnéticas por soportes o mástiles de apoyo en la alimentación de antenas de tipo reflectarrays o reflectores. Se han presentado la caracterización y comparación de prestaciones sobre un amplio margen de frecuencia (0-20 GHz) de diferentes formas de soportes diseñadas mostrando sus ventajas e inconvenientes para la polarización TE. Se han implementado estructuras metamateriales con condiciones "hard" que recubran estos soportes cilíndricos para la polarización TM. Estas estructuras han sido caracterizadas en función de sus parámetros de diseño y se ha mostrado que permiten conseguir un efecto de invisibilidad de estos soportes mejorando así las prestaciones de antenas cuando la dirección de incidencia de la onda es conocida. Para poder definir la calidad de la invisibilidad de estos soportes se ha utilizado el parámetro de anchura de bloqueo equivalente definido en el capítulo correspondiente. También se han propuesto soluciones que reducen el bloqueo simultáneamente para las polarizaciones TE y TM consiguiéndolo en una banda estrecha de frecuencia. En particular, una capa del dieléctrico y tiras metálicas han sido utilizadas para crear la condición de superficie "hard" para las dos polarizaciones simultáneamente. Los parámetros tales como el período de las tiras o la longitud de sección transversal de los soportes son críticos para conseguir un buen funcionamiento. Ambos factores, como el diseño de la forma y la realización de la condición de superficie hard para los soportes son fundamentales para reducir el bloqueo. El análisis de este trabajo se ha limitado a

una onda plana incidente normal y oblicua en el plano azimut al soporte.

Por lo tanto, el objetivo principal de esta tesis doctoral es ampliar el conocimiento del análisis, diseño y funcionamiento de las estructuras metamateriales para contribuir, proponer y aportar posibles soluciones, que mediante la aplicación de estas estructuras, ayuden a mejorar las prestaciones de antenas planas.