

Técnica Inversa basada en Algoritmos Genéticos para la Caracterización Dieléctrica de Materiales

M^a Eugenia Requena Pérez, Elsa Domínguez Tortajada, Antonio J. Lozano Guerrero,
Juan Monzó Cabrera y Alejandro Díaz Morcillo.
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Cartagena
Campus Muralla de Mar. Cuartel de Antiguotes. 30202 Cartagena
Teléfono: 968325374 Fax: 968325973
E-mail: alejandro.diaz@upct.es

Resumen. *El conocimiento de las propiedades dieléctricas de los materiales ha adquirido gran importancia en un elevado número de aplicaciones y se ha convertido en uno de los temas punteros en la investigación sobre compatibilidad electromagnética. En los últimos años se han desarrollado multitud de aplicaciones de las microondas en los diferentes sectores industriales como son las comunicaciones, microelectrónica, radar, calor industrial, etc. El diseño de dispositivos y/o sistemas destinados a estas industrias exige un conocimiento preciso de las propiedades dieléctricas de los materiales usados. Con el fin de poder caracterizar estos materiales el Grupo de Electromagnetismo y Materia ha desarrollado una técnica inversa basada en Algoritmos Genéticos que es capaz de estimar con precisión las propiedades dieléctricas de materiales no homogéneos y con formas arbitrarias.*

1 Introducción

El uso de ciertos materiales con fines industriales [1-2] exige el conocimiento preciso de sus propiedades dieléctricas. Actualmente la evaluación de dichas propiedades se considera como uno de los aspectos fundamentales de la tecnología de microondas. Existe una continua demanda de métodos que sean capaces de medir con precisión la permitividad compleja de los materiales. Durante años se han desarrollado distintos métodos de medida de propiedades dieléctricas [3-7]. Entre estos métodos destacan: los métodos de cavidad resonante o perturbacional, el método en reflexión, el método de la sonda dieléctrica y el de transmisión/reflexión. Cada uno de ellos tiene su rango de aplicación y sus limitaciones inherentes. Por ejemplo, las técnicas basadas en resonadores son precisas; sin embargo, están muy limitadas en ancho de banda. Los métodos de reflexión son no destructivos, no necesitan procesar el material, pero son poco precisos. Las técnicas basadas en transmisión/reflexión quizá sean las más sencillas y su precisión es aceptable, siempre y cuando se tengan en cuenta los tres problemas inherentes a las mismas: los huecos de aire, las resonancias a media longitud de onda y el *overmoding* [6]. Estos métodos, llamados métodos clásicos, en ocasiones no ofrecen la precisión deseada y además imponen limitaciones en la forma y homogeneidad de la muestra.

En el Grupo de Electromagnetismo y Materia (GEM) se ha desarrollado una técnica inversa basada en Algoritmos Genéticos (AG) mediante la cual se determina la permitividad compleja ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$) de muestras con formas arbitrarias y materiales tanto homogéneos como heterogéneos. Dicha técnica obtiene las propiedades dieléctricas del material (o

materiales, si se trata de una muestra no-homogénea) mediante la comparación de los parámetros de dispersión (S): por un lado el conjunto de parámetros medidos con un analizador de redes vectorial junto con un kit de guía onda y, por otra parte, los parámetros de dispersión obtenidos mediante la simulación de la misma estructura. Esta diferencia es el parámetro a minimizar por el AG.

2 Metodología

Como se ha comentado, la técnica desarrollada en el seno del GEM obtiene la permitividad compleja del material mediante la comparación de los parámetros S medidos y los simulados. Es decir, se trata de un proceso de optimización-simulación iterativo que opera de la siguiente manera: inicialmente el algoritmo de optimización propone unos valores de permitividad con los que se aplica la simulación para calcular los parámetros S simulados. A continuación, el algoritmo de optimización evalúa la función de error y propone en la siguiente iteración otros valores de permitividad que disminuyan el error. Se itera el proceso hasta que error = 0, es decir, hasta que los parámetros simulados sean iguales a los medidos, o bien hasta que se llegue a un determinado número de iteraciones.

2.1 Simulación del problema

En el grupo se han desarrollado tres técnicas basadas en la misma filosofía, no obstante cada una de ellas utiliza un simulador diferente.

En primer lugar se utiliza un simulador analítico, el cual computacionalmente es muy rápido. Esta simulación analítica no es más que un conjunto de ecuaciones matemáticas que permiten calcular los parámetros S de la red de microondas a partir de las

permitividades complejas de los dieléctricos que forman una estructura. Los parámetros S simulados se calculan a partir de un producto matricial de matrices $[T]$ (matriz de transferencia). Las muestras deben tener la misma sección que la guía de onda rectangular. El desarrollo de este simulador analítico se ha implementado en Matlab. Como se ha comentado, la gran ventaja de la técnica analítica es su rapidez y su inconveniente es que la estructura tiene que cumplir ciertas condiciones en su geometría.

En segundo lugar se ha desarrollado un simulador en dos dimensiones (2D), implementado en Matlab[®] y que hace uso de la herramienta PDETool. Esta herramienta permite resolver problemas bidimensionales en régimen estacionario y en régimen transitorio mediante el método de elementos finitos. El hecho de no poder realizar problemas en 3D obliga a simplificar los diferentes problemas pasando de geometrías en el espacio a representaciones bidimensionales. Esta técnica en 2D tiene la ventaja de que sigue siendo rápida y el grado de libertad en la geometría del problema es mayor que en la técnica analítica ya que la muestra debe ser invariante solamente en uno de sus ejes.

Por último y siguiendo la progresión lógica, en la tercera técnica se utiliza un simulador tridimensional. Se trata de un programa comercial, CST Microwave Studio[®], capaz de resolver problemas de electromagnetismo en alta frecuencia mediante el método de Integración Finita [8-9]. La técnica en 3D tiene un gran coste computacional; sin embargo las limitaciones en la geometría del problema no existen (exceptuando la capacidad de representación gráfica del simulador).

2.2 Proceso de optimización

El proceso de optimización de las propiedades dieléctricas mediante la técnica inversa basa su idea en la minimización de una función de error, que depende de los parámetros S medidos con el analizador de redes y de los parámetros S simulados con cualquiera de los simuladores descritos.

Los AG son métodos sistemáticos para la resolución de problemas de búsqueda y optimización que aplican a éstos los mismos métodos de la evolución biológica: selección basada en la población, reproducción y mutación. Los AG son capaces de resolver la mayoría de los inconvenientes que presentan los algoritmos de optimización tradicionales y además buscan la solución global del problema al evaluar todo el conjunto de posibles soluciones.

El AG utilizado está implementado en Matlab[®]. Cada generación de dicho algoritmo la forman varios individuos, cada uno de los cuales es una posible solución de la permitividad compleja (o permitividades complejas si se trata de un material

no-homogéneo) de la muestra, es decir, cada individuo está formado por la(s) constante(s) dieléctrica(s), la(s) tangente(s) de pérdidas y su(s) aptitud(es). La función que evalúa la aptitud o capacidad de cada individuo, $F(x_k)$, es una combinación de comparaciones entre los parámetros de dispersión medidos y los simulados. Cuanto más parecidos sean los parámetros medidos y simulados mejor será el individuo x_k y, por tanto, tendrá mayor probabilidad de sobrevivir y pasar a la siguiente generación.

3 Resultados

En primer lugar se muestra el problema estudiado mediante la técnica analítica. Se trata de una estructura multicapa compuesta por tres materiales o láminas que rellenan completamente la sección de la guía-onda: una muestra de resina de poliéster, una muestra de espuma de poliestireno y otra muestra de teflón (figura 1).

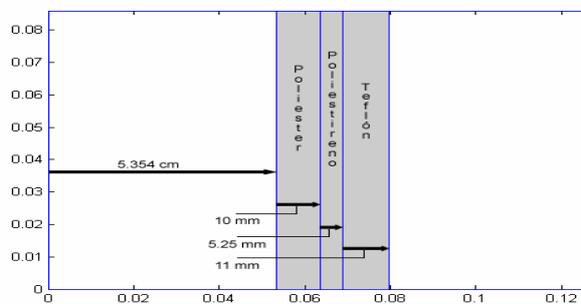


Figura 1. Estructura multicapa de tres materiales.

A continuación se muestra la configuración estudiada por la técnica 2D para hallar su permitividad. La estructura es una pieza de PTFE con forma de 'E', la cual es invariante en uno de sus ejes (figura 2). Éste es un caso típico en el que los métodos clásicos no son capaces de diferenciar la permitividad del aire y la de la muestra, y obtienen una permitividad efectiva de todo el conjunto. Sin embargo, nuestra técnica 2D calcula las propiedades dieléctricas del PTFE con un error relativo del 0,96%.

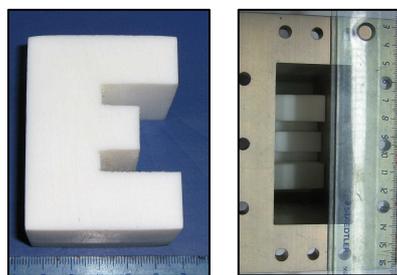


Figura 2. Muestra de PTFE con forma de 'E'.
Muestra en el soporte de guía-onda.

Por último se muestra la configuración estudiada mediante la técnica 3D. Se trata de una pieza de PTFE con forma de estrella (figuras 3 y 4). Al igual que en el caso de la 'E', hallar la permitividad de una estrella mediante los métodos clásicos es prácticamente imposible; sin embargo la técnica 3D es capaz de estimarla con un error relativo del 1,44%.

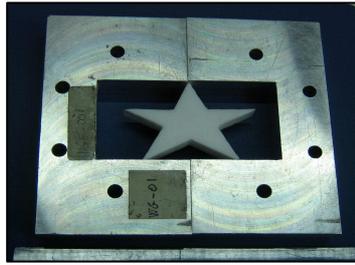


Figura 3. Muestra de PTFE con forma de estrella dentro del soporte de guía-onda

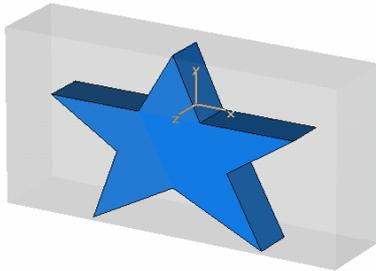


Figura 4. Interface gráfico del programa CST Microwave Studio. Estructura de estrella de PTFE.

En la Tabla I se muestran los valores de permitividad obtenidos mediante la técnica de ‘Nicholson, Ross y Weir’ [3-4] y se comparan con la estimación que hacen cada una de las técnicas desarrolladas por el GEM. Es fácil observar que la parte real es muy similar y que el error relativo del módulo de la permitividad compleja es igual o menor al 5%.

Material Optimizado	Técnica ‘Nicholson-Ross’	Técnicas GEM	Error Relativo del Módulo
		T. Analítica	
Resina de Poliéster	3.6 - 0.02i	3.6-0.07i	0.003 %
Espuma de Poliestireno	1.59-0.002i	1.54-0.02i	1.59 %
PTFE	2.1-0.01i	1.9-1.6e-6i	5 %
‘E’ de PTFE	2.1-0.01i	Técnica 2D	
		2.06-0.003i	0.962 %
		Técnica 3D	
Estrella de PTFE	2.1-0.01i	2.04-0.03i	1.44%

TABLA I: Permitividad compleja obtenida con las diferentes técnicas.

El coste computacional no es comparable de una técnica a otra, puesto que las estructuras analizadas no son las mismas; sin embargo, sí que nos podemos hacer una idea en términos de tiempo. La técnica analítica ha conseguido la permitividad de la estructura descrita en la figura 1 en 33.2 segundos. La técnica 2D calcula la permitividad de la ‘E’ de PTFE en 2 horas y 22 minutos y por último la técnica 3D requiere de 15 horas y 62 minutos en estimar las propiedades dieléctricas de la estrella.

4 Conclusiones

En este artículo se ha mostrado que es posible hallar la permitividad compleja de materiales con formas no-canónicas. La convergencia de las tres técnicas

inversas ha sido probada, siendo lo más relevante el hecho de que la técnica es capaz de diferenciar las permitividades de los distintos elementos que forman la muestra. Se ha demostrado su precisión y eficiencia determinando la permitividad compleja de varias muestras y comparándolas con la permitividad proporcionada por el método de Nicholson-Ross y Weir. La técnica aquí descrita requiere una simulación lo más real posible (lo cual no es trivial) y un equipo capaz de medir los parámetros de dispersión de la estructura de medida que contiene la muestra. En el GEM estamos trabajando para conseguir hallar la permitividad compleja de cualquier material.

Referencias

- [1] Metaxas A.C. and Meredith R.J., “Industrial Microwave Heating”, Peter Peregrinus Ltd., London, U.K., 1983.
- [2] J. Thuery, *Microwaves: Industrial, Scientific and Medical Applications*, Artech House, Estados Unidos, 1992.
- [3] Nicholson, A.M.; and Ross, G.F., “Measurement of the intrinsic properties of materials by time domain techniques” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-19, pp. 377-382, November 1970.
- [4] Weir, W.B., “Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies”, *Proc. IEEE*, vol. 62, pp. 33-36, January 1974.
- [5] Afsar, M.U. Birch, J. R. Clarke, R. N. and Chantry, G. W. (1986). “The measurement of properties of materials” *Proceedings of the IEEE*, 74, pp. 183-199.
- [6] Baker-Jarvis, J. Janezic, M. D. Grosvenor, J. H. Jr. and Greyer, R.G. (1993). *Transmission / Reflection and Short-circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability*, NIST Technical Note 1355, U.S. Department of Commerce.
- [7] Krupka, J. and Weil, C. “Recent advances in metrology for electromagnetic characterization of material at microwave frequencies”. *12th International Conference on Microwave and Radar*, 4, 243-245. 1998.
- [8] “CST Microwave Studio manuals, HF design and analysis”, 4th version, 2002.
- [9] M. Clemens and T. Weiland, “Discrete Electromagnetism with the Finite Integration Technique”, *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 32, 65-87, 2001.