

Puesta en Marcha de un Sistema de Caracterización de Materiales en la Banda de Milimétricas

Sergio Ortiz-Ruiz⁽¹⁾, Mario Pérez-Escribano^(2,3), Salvador Moreno-Rodríguez⁽³⁾,
Francisco J. García-Ruiz⁽¹⁾, Carlos Molero⁽³⁾, Pablo Padilla⁽³⁾, Enrique Márquez-Segura⁽²⁾

⁽¹⁾Department of Electronics and Computer Science, University of Granada, 18071 Granada, Spain.

Pervasive Electronics Advanced Research Laboratory (PEARL).

⁽²⁾Telecommunication Research Institute (TELMA), Universidad de Málaga, E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación, 29010 Málaga, Spain.

⁽³⁾Department of Signal Theory, Telematics and Communications, Research Centre for Information and Communication Technologies (CITIC-UGR), University of Granada, Granada, Spain.

Resumen—En este trabajo se describe el proceso seguido para la puesta en marcha de un sistema de caracterización de la permitividad y permeabilidad complejas de materiales en la banda de frecuencias de ondas milimétricas. Para ello, se muestra, en primer lugar, el método utilizado, así como el proceso de calibración del sistema, consistente en una doble calibración TRL (Thru-Reflect-Line) y GRL (Gated-Reflect-Line). Posteriormente, se estudia cómo pueden afectar desviaciones en la medida, tales como errores en la distancia entre antenas, o la incidencia oblicua sobre el material, a la solución estimada. Se propone, además, una técnica de suavizado que permite mejorar la exactitud de los resultados. Por último, se realiza un test sobre una muestra de teflón de 6 mm de grosor, demostrando que los resultados son bastante fiables en todo el ancho de banda medido.

Palabras Clave—Caracterización de Materiales, Medidas de Banda Ancha, Ondas Milimétricas.

I. INTRODUCCIÓN

En la industria de las comunicaciones, son muchos los materiales presentes en el diseño y fabricación de dispositivos. Estos materiales son de diversa índole, y pueden estar fabricados con distintas finalidades: diseño de dispositivos radiantes, absorbentes, o reflectores, entre otros. Sin embargo, para poder usar correctamente los materiales, es necesario tener un conocimiento previo de las propiedades electromagnéticas que los caracterizan. En particular, para materiales no conductores, destacan la permitividad eléctrica y permeabilidad magnética. Ambas son magnitudes complejas, y serán un indicativo claro del comportamiento de dichos materiales ante la incidencia de un campo electromagnético.

Tradicionalmente, en la bibliografía se pueden encontrar dos grandes grupos de métodos de caracterización. Por un lado, los métodos resonantes [1] aprovechan las resonancias de cavidades para extraer las propiedades de los materiales en unas frecuencias determinadas. Se trata de métodos de gran exactitud, si bien presentan el inconveniente de proporcionar un conjunto de soluciones en un dominio discreto de frecuencias, correspondientes a las que se producen resonancias dentro de una cavidad. Por otro lado, los métodos no resonantes o de banda

ancha se han basado tradicionalmente en medidas de reflexión y transmisión del material en espacio libre. Destaca el propuesto por Nicolson-Ross-Weir (NRW) [2]. Idealmente, trabajan en un ancho de banda infinito, que estará limitado en la realidad por el sistema de transmisión guía-antena. El problema de este tipo de métodos es que necesita bastante exactitud en el alineamiento, además del empleo de técnicas de calibración que permitan aislar los efectos de la muestra respecto a la propagación en espacio abierto. En este sentido, Baker-Jarvis et al. propusieron, en 1990, una técnica que permitía extraer las características del material a partir de las medidas de la muestra [3], conociendo con exactitud la distancia entre los planos de calibración y el grosor de la muestra.

En general, las técnicas de extracción de las propiedades de los materiales se dividen, a su vez, en tres categorías. La primera es la que calcula la permitividad, ϵ_r^* , y permeabilidad, μ_r^* , a partir de ecuaciones en las que las incógnitas son variables a despejar, utilizando medios de transmisión, cavidades o transmisión y reflexión en espacio libre [4]. El segundo grupo es el que comprende el uso de algoritmos genéticos, evolutivos o de optimización junto a ecuaciones analíticas [5], las cuales no pueden ser resueltas directamente. El último grupo de métodos es el que propone el uso de algoritmos de optimización utilizando simuladores electromagnéticos, que intentan encontrar semejanzas entre medidas y simulaciones para estudiar las características de los materiales [6].

En esta contribución se utilizará un método de banda ancha, basado en la medida en espacio libre, y que parte de la solución de ecuaciones analíticas para la estimación de los parámetros del material. En la Sección II se describen el método de medida utilizado y el proceso de calibración, para posteriormente mostrar un estudio de sensibilidad a posibles variaciones que puedan alterar la estimación de la medida. En la Sección III se realiza una validación experimental con una muestra de 6 mm de grosor de teflón, en la banda de 50 a 57 GHz. Por último, en la Sección IV, se detallan las conclusiones más importantes extraídas de la realización del trabajo.

II. MÉTODO DE MEDIDA

A. Método de medida

El método de medida utilizado fue inicialmente definido en [4], que se corresponde con una variación del planteado en [3]. Concretamente, los autores de [4] proponen el empleo de una guía coaxial con dieléctrico aire, por la cual se propaga un modo TEM, conociendo perfectamente la distancia entre antenas, L_{air} , y el grosor del material a caracterizar, L . A partir de esta premisa, planteaban un sistema invariante a la posición relativa del material con los planos de referencia, es decir, en el que el material podía no estar en el centro de la línea de transmisión. La principal limitación de este método es la necesidad de disponer de una guía coaxial rellena de aire, en la que se pudieran insertar las muestras de material a caracterizar. Con el objetivo de facilitar el método de medida, en el trabajo realizado se propone utilizar un esquema de medición en espacio libre, utilizando un sistema compuesto por antenas de bocina y lentes que generen un frente de onda plano, tal y como se muestra en el esquema de la Fig. 1. La principal dificultad, en este caso, es el poder conocer con exactitud la distancia de aire L_{air} . Para ello, es necesario abordar la calibración del sistema.

B. Método de calibración del analizador

Para realizar la calibración del sistema se propone el uso conjunto de dos métodos. En primer lugar, se realiza una calibración TRL en el final de la guía de onda que alimenta la antena. Para ello, se ha diseñado un kit en aluminio para el estándar WR-15, compuesto por un cortocircuito, que hará las funciones de reflect, y una línea de 2 mm de longitud. Con este método, se consiguen poner los planos de referencia justo a la entrada de las bocinas, concretamente en transición guía de onda-bocina. Posteriormente a la medida, se realiza una calibración GRL de espacio libre. Esta calibración, que fue inicialmente propuesta en [7], consiste en tomar dos medidas: (i) del portamuestras vacío y (ii) del portamuestras sosteniendo una placa metálica, en la que se asume reflexión total del frente de onda plano. A partir de ambas medidas, se realiza un proceso similar al seguido en la calibración TRL. La principal diferencia es que se lleva a cabo un proceso de enventanado temporal (*time gating*), que permite aislar los efectos de la propagación hasta el portamuestras. Dentro de este enventanado, se incluyen los efectos de las antenas y las lentes, utilizadas para conformar el frente de onda plano. Una vez realizada la calibración, se asumirá que los planos de referencia están en el material, sobre el que se está produciendo la incidencia normal de una onda plana.

C. Estudio de sensibilidad

La precisión de las longitudes que intervienen en el sistema de medida tiene una alta influencia sobre los resultados finales. La mala fijación de variables como la anchura de la muestra, L , la distancia entre las antenas, L_{air} , o el alineamiento vertical de la muestra con respecto al frente de ondas, repercute con un peso elevado en

la determinación de las características principales del material en cuestión. Los resultados del índice de refracción al cuadrado (n^2) y de las permitividades (ϵ_r^*) y permeabilidades (μ_r^*) relativas complejas para distintas tolerancias de las variables anteriormente comentadas se pueden apreciar en las Fig. 2, 3 y 4. Por una parte, la Fig. 2 representa el efecto de un mal alineamiento horizontal de la muestra con respecto a los planos de referencia, observando grados de incidencia de 0° (muestra alineada), 2.5° (muestra desalineada 2.5° con respecto al plano) y 5° . La Fig. 3 representa el impacto de desviaciones en la variable L_{air} ($\pm 0,2$ mm) con respecto a la medida exacta entre antenas. Por último, la influencia de la anchura de la muestra a testear sobre los resultados alcanzados, se puede observar en la Fig. 4. Se puede destacar cómo, tolerancias de $\sim 0,1$ mm en la anchura del material, desajustan considerablemente la medida realizada. Considerando los resultados obtenidos, se puede concluir que existe una alta correlación entre ellos y las variables del sistema.

D. Procesado de los resultados

Los resultados de las medidas se ven altamente afectados por señales espurias que pueden afectar a la estimación de los parámetros de los materiales. En este sentido, en la bibliografía se pueden encontrar varias técnicas para suavizado de los resultados, de manera que estos sean más fiables. Una de las técnicas más destacadas es la propuesta en [8], consistente en el uso de filtros de Savitzky-Golay. En este caso, se ha demostrado que, a la hora de reducir interferencias de posibles señales, como pueden ser reflexiones en el sistema de medida, el uso de estos filtros es equivalente, o incluso más eficiente, que el uso de otras técnicas como el *time-gating*. Es por ello que para esta contribución se han empleado este tipo de filtros, con polinomios de orden 2 y ventanas de 51 puntos para el procesado de los resultados.

III. RESULTADOS

Para validar la teoría propuesta, se ha procedido a realizar un experimento en la banda de 50 a 57 GHz. Para ello, se ha montado un *setup* formado por el analizador de redes Rohde-Schwarz ZVA-67, dos transiciones de coaxial de 1.85 mm a guía de onda WR-15 y dos antenas de bocina. Además, se han posicionado dos lentes de Greenlight, con las que se crea un frente de onda plano. Por último, se ha colocado una muestra de teflón de 6 mm de espesor en el centro de la mesa óptica, sin considerar que esta tuviera que estar situada en el punto medio entre ambas antenas. La Fig. 5 muestra una foto del esquema completo de medición. El proceso de medición comienza fijando los límites de frecuencia del analizador, estableciendo 2001 puntos de medición, con una potencia de -5 dBm en los puertos y un ancho de banda de frecuencia intermedia de 1 kHz. Posteriormente, se realiza una calibración TRL en el propio analizador con el kit mencionado en la sección II.B. Una vez realizado, se conectan las antenas y se procede a la correcta alineación de las mismas con las lentes. Por último, es necesario colocar el portamuestras y tomar mediciones del mismo

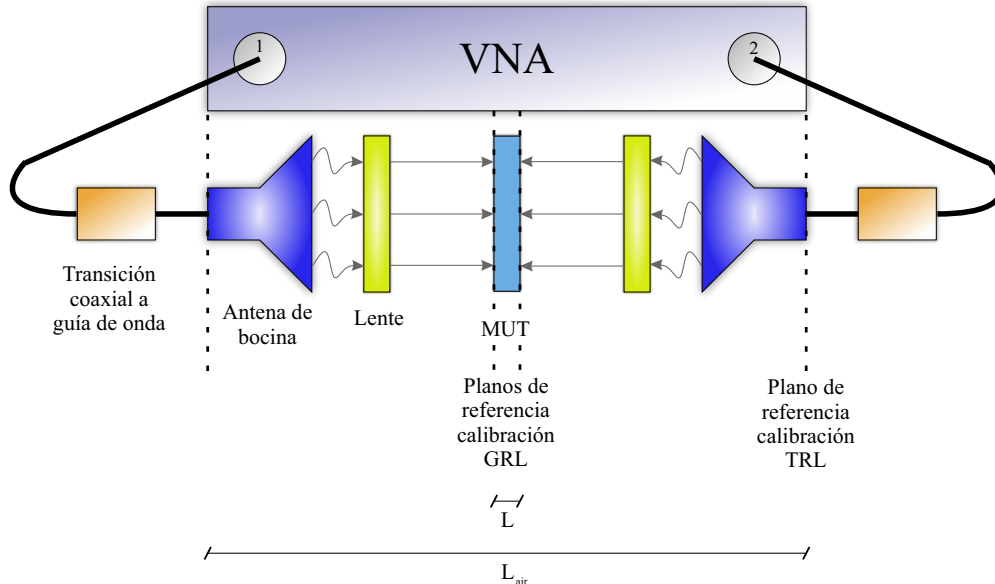


Fig. 1. Esquema de medida empleado para caracterización de materiales en espacio libre.

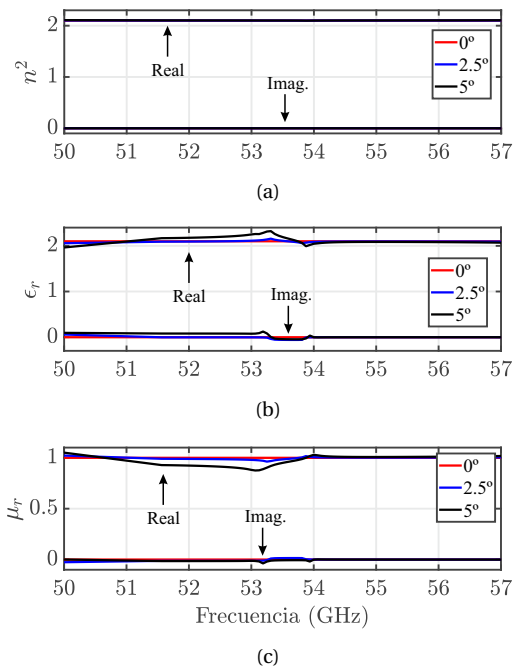


Fig. 2. Resultados mediante simulación en ANSYS HFSS de la medida de una muestra de teflón de 6 mm para diferentes ángulos de incidencia del frente de ondas en el material: (a) Parte real e imaginaria del índice de refracción al cuadrado (n^2), (b) Parte real (ϵ_r') e imaginaria (ϵ_r'') de la permitividad relativa, (c) Parte real (μ_r') e imaginaria (μ_r'') de la permeabilidad relativa.

vacío, con una plancha metálica y el propio material a caracterizar. Terminado este proceso, se procede a realizar, en MATLAB®, la calibración GRL, que permitirá aislar los efectos de la muestra y también del portamuestras vacío. Tras la realización de ambas calibraciones, es momento de aplicar el método de caracterización. En este punto, es importante destacar que el grosor de la plancha metálica empleada para la calibración es ligeramente superior al del material a medir ($L_{air} = 6,7$ mm), por lo que se procede a incluir este dato en el método de caracterización. Los resultados del índice de refracción al cuadrado (n^2) y de las permitividades y permeabilidades

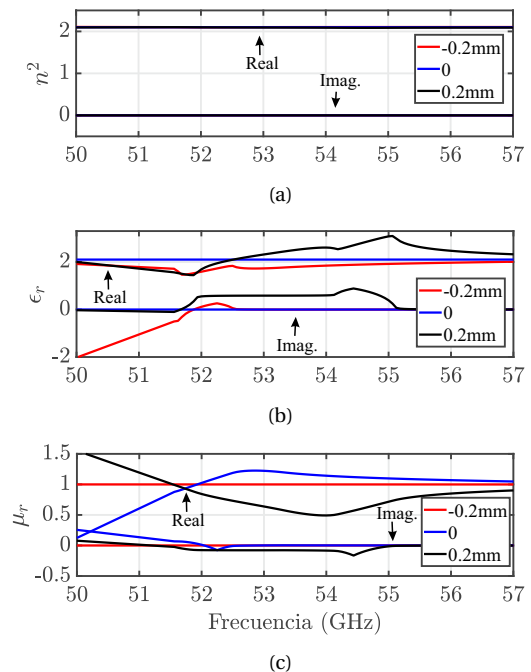


Fig. 3. Resultados mediante simulación en ANSYS HFSS de la medida de una muestra de teflón de 6 mm para diferentes desviaciones con respecto a la distancia real entre antenas (L_{air}): (a) Parte real e imaginaria del índice de refracción al cuadrado (n^2), (b) Parte real (ϵ_r') e imaginaria (ϵ_r'') de la permitividad relativa, (c) Parte real (μ_r') e imaginaria (μ_r'') de la permeabilidad relativa.

relativas complejas se muestran en la Fig. 6. Como se puede ver, estos son semejantes a los esperados de este material, que generalmente es usado como patrón, ya que sus permitividades y permeabilidades relativas son bien conocidas ($\epsilon_r^* = 2,1$ y $\mu_r^* = 1$). Como se puede observar, los resultados obtenidos son muy cercanos a dichos valores, por lo que se puede concluir que el método propuesto está funcionando correctamente.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se han propuesto una serie de técnicas para la caracterización de la permitividad y permeabilidad

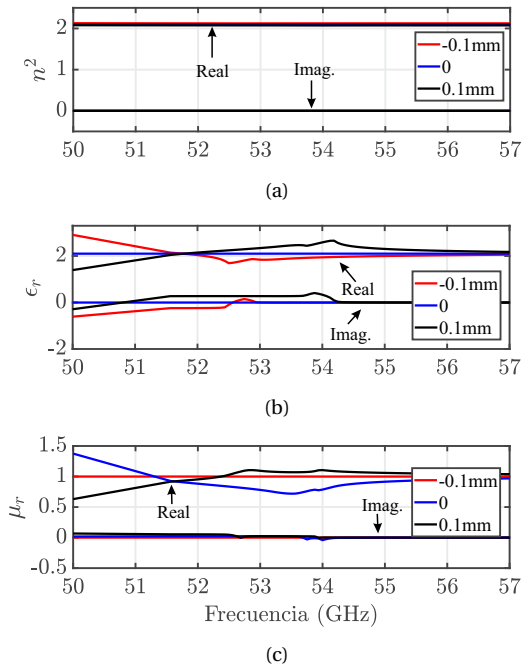


Fig. 4. Resultados mediante simulación en ANSYS HFSS de la medida de una muestra de teflón de 6 mm para diferentes desviaciones con respecto a la distancia del material (L): (a) Parte real e imaginaria del índice de refracción al cuadrado (n^2), (b) Parte real (ϵ'_r) e imaginaria (ϵ''_r) de la permitividad relativa, (c) Parte real (μ'_r) e imaginaria (μ''_r) de la permeabilidad relativa.

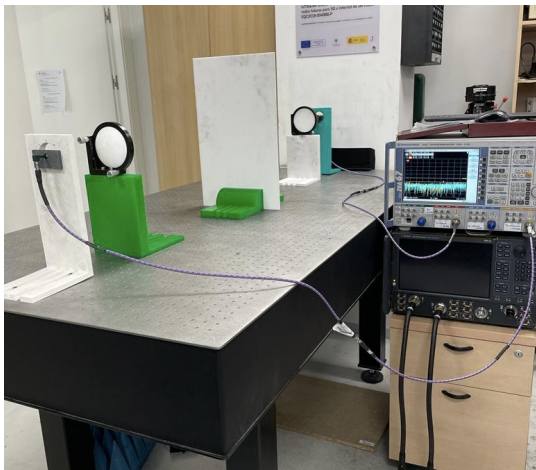


Fig. 5. Fotografía del *setup* utilizado para caracterización de materiales.

complejas de materiales. Para ello, se ha partido del método clásico NRW, en combinación con la variante de Baker-Jarvis, para utilizar un método de banda ancha que sea invariante a la posición del material a caracterizar. Posteriormente, se ha evaluado cómo realizar la calibración del sistema y se ha realizado un estudio de cómo los errores en la medida pueden afectar a la estimación. Por último, también se ha empleado una técnica de procesado que permiten mejorar la respuesta en puntos de frecuencia que se ven afectados por factores ajenos a la medida, como reflexiones en la mesa óptica. Por último, se ha realizado una validación experimental del sistema como una muestra de teflón, material conocido en el ámbito de la radiofrecuencia, comprobando que los resultados son certeros en todo el ancho de banda.

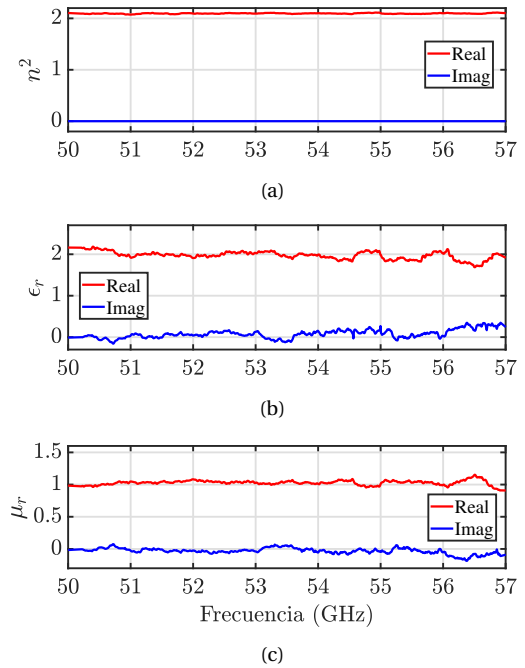


Fig. 6. Resultados experimentales de la medida de una muestra de teflón de 6 mm: (a) Parte real e imaginaria del índice de refracción al cuadrado (n^2), (b) Parte real (ϵ'_r) e imaginaria (ϵ''_r) de la permitividad relativa, (c) Parte real (μ'_r) e imaginaria (μ''_r) de la permeabilidad relativa.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la ayuda PID2020-116968RB-31 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y Unión Europea NextGenerationEU/PRTR, así como por las ayudas PID2020-112545RB-C54, PDC2022-133900-I00, A-TIC-646-UGR20, TED2021-129938B-I00 y TED2021-131699B-I00; y por el Ministerio de Universidades del Gobierno de España y la Unión Europea NextGenerationEU, con fondos del Programa Margarita Salas.

REFERENCIAS

- [1] C. Weil, C. Jones, Y. Kantur, and J. Grosvenor, "On rf material characterization in the stripline cavity," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 2, pp. 266–275, 2000.
- [2] A. M. Nicolson and G. F. Ross, "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 19, no. 4, pp. 377–382, 1970.
- [3] J. Baker-Jarvis, E. Vanzura, and W. Kissick, "Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, no. 8, pp. 1096–1103, 1990.
- [4] K. Chalapat, K. Sarvala, J. Li, and G. S. Paraoanu, "Wideband reference-plane invariant method for measuring electromagnetic parameters of materials," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, no. 9, pp. 2257–2267, 2009.
- [5] J. Zhang, M. Y. Koledintseva, J. L. Drewniak, D. J. Pommerenke, R. E. DuBroff, Z. Yang, W. Cheng, K. N. Rozanov, G. Antonini, and A. Orlandi, "Reconstruction of dispersive dielectric properties for pcb substrates using a genetic algorithm," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, no. 3, pp. 704–714, 2008.
- [6] A. Hosseinbeig, S. Marathe, and D. Pommerenke, "Characterization of relative complex permittivity and permeability for magneto-dielectric sheets," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 6, pp. 1786–1794, 2018.
- [7] P. Bartley and S. Begley, "Improved free-space s-parameter calibration," in *2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, vol. 1, 2005, pp. 372–375.
- [8] D. Ma, X. Shang, N. M. Ridler, and W. Wu, "Assessing the impact of data filtering techniques on material characterization at millimeter-wave frequencies," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–4, 2021.