

Efectos de la Conductividad en la Estimación de los Parámetros de Propagación de una Línea Stripline Fabricada Mediante Impresión de Tintas Conductoras

M. Pérez-Escribano⁽¹⁾, F.-J. Martín-Bayona⁽²⁾, E. Márquez-Segura⁽³⁾
{mpe⁽¹⁾, fjmb⁽²⁾, ems⁽³⁾}@ic.uma.es

Instituto de Telecomunicación (TELMA), Universidad de Málaga, CEI Andalucía TECH
E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación, Boulevard Louis Pasteur 35, 29010 Málaga (España)

Abstract—This contribution presents the characterization of a stripline embedded in a coaxial system. The stripline has been manufactured using HIPS as the main substrate. The metallic strip has been manufactured on 50mm thick kapton film which is binded to the main substrate. The transmission line plays a very important role in the overall performance of the ultrawideband radiating element currently under development. A multilayer method has been used for the characterization of the stripline. The influence of the conductivity obtain in the fabrication of the conductive ink on the propagation characteristics of the transmission line is analyzed. Simulations and measurements assess the goodness and possible negative effects of the fabrication process to rely on it for future designs.

I. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva de componentes de microondas ha permitido, con las limitaciones inherentes a las diferentes tecnologías existentes, fabricar circuitos con coste significativamente reducido y especificaciones ajustadas a determinadas aplicaciones [1], [2]. Aunque en ciertos ámbitos se considera la fabricación aditiva como poco competitiva con relación a las técnicas de fabricación convencionales, el cumplimiento de las especificaciones del sistema completo marcará la viabilidad de la tecnología a emplear. Si bien en elementos radiantes y guías de onda existen numerosos trabajos [3] con resultados que dependen de la tecnología de fabricación aditiva empleada, no existen muchos trabajos donde las líneas de transmisión sean el foco principal [4]. La necesidad de interconectar sistemas basados en coaxial a elementos radiantes obliga a la utilización de líneas de transmisión fabricadas con la misma tecnología de fabricación de los elementos radiantes, tal y como se muestra en la Fig. 1. La línea de transmisión juega un papel fundamental ya que interconectará las diferentes partes del circuito. Específicamente, la realización de elementos de circuitos planos requiere del uso de tecnologías para fabricar los trazados de las diferentes pistas del circuito. Este tipo de construcción ha demostrado sus posibilidades y se sigue avanzando en ellas. Una de las posibilidades es usar la tecnología de inyección de tinta con materiales metálicos. La Fig. 2 muestra el conjunto de capas que se empleará en este trabajo. Se usará *High Impact Polystyrene* (HIPS) como material dieléctrico, en este caso para una línea stripline. La metalización de los planos de masa superior e inferior se realizará mediante la deposición de metal mediante aerosol. La pista central se realizará mediante la impresión de tinta de

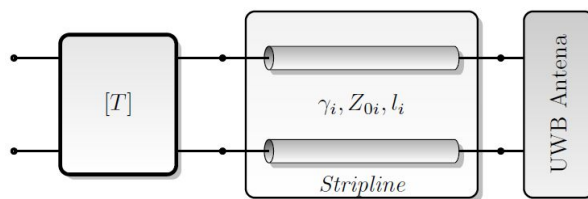


Fig. 1. Esquema del sistema global.

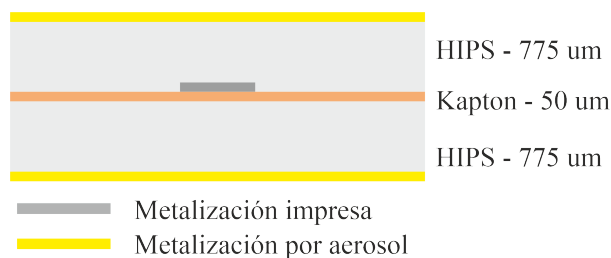


Fig. 2. Descripción de las capas del prototipo.

nanopartículas de plata sobre un sustrato de kapton. Este proceso requiere de un curado de la tinta o del material empleado, que en caso de no realizarse correctamente puede dar lugar a pistas con conductividad muy baja, cambiando el valor de la permitividad relativa efectiva de la estructura. Este, al ser inicialmente esperado un modo TEM, debería coincidir con la permitividad del dieléctrico. Este trabajo presenta un estudio experimental del efecto de la conductividad de la pista sobre las constantes de fase y atenuación de la línea de transmisión en estudio. En la segunda sección se mostrará la descripción concreta de la estructura. En la tercera, el método de caracterización empleado haciendo uso de medidas de parámetros S dos puertos. Finalmente, se mostrarán los resultados experimentales obtenidos y se darán las conclusiones extraídas de la realización de la presente contribución.

II. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La fabricación aditiva de un elemento radiante ha requerido el diseño de una transición de línea strip a coaxial para su conexión a un entorno de impedancia de 50Ω tal y como se muestra en Fig. 1. Se ha empleado una transición de coaxial a stripline a cada lado de la línea strip. Dicha

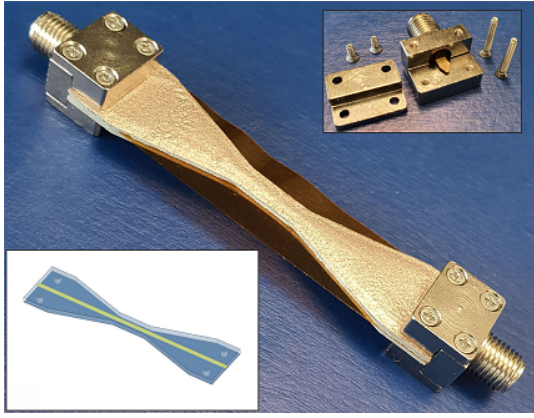


Fig. 3. Línea de transmisión completa ensamblada con conectores, así como despiece del conector y diagrama de la estructura simulada.

línea esta construida empleando dos substratos realizados en HIPS y posteriormente metalizados. Estos substratos han sido fabricados mediante extrusión de filamento empleando la impresora Ultimaker 3 con una altura de $100 \mu\text{m}$ para cada una de las capas con densidad del 100%. La Fig. 3 muestra una fotografía de la estructura completa montada, así como el despiece del conector comercial empleado. Entre ambos substratos se inserta una película de kapton donde se han impreso las líneas de transmisión mediante impresión de tinta de nanopartículas de plata [5] empleando la impresora de material Fujifilm Dimatix DMP2850. En esta estructura no se produce una transformación de impedancia, ya que el ancho de la línea se mantiene constante en un valor de 1.23 mm. El taper que se encuentra en el plano de masa se utiliza únicamente para poder atornillar el conector a la estructura y no provoca una gran diferencia en la impedancia de la línea. En cualquier caso, este cambio de impedancias no afectaría al método de caracterización, como se explicará en los próximos apartados.

III. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN

A. Caracterización de la línea de transmisión

Para caracterizar la línea de transmisión, y así poder obtener de ella su constante de propagación, se usa un método basado en medidas de transmisión y el uso de invariantes [6]. Este tipo de métodos permiten estimar la constante de propagación en banda ancha a partir de la medida de dos líneas de transmisión de distintas longitudes. El punto de partida es la medida de los parámetros S de ambas líneas. Como se puede ver en la Fig. 4, se están conectando en cascada los bipuertos correspondientes a cada una de las transiciones, así como a la línea de transmisión. Para poder utilizar la multiplicación de matrices en cascada, los parámetros S se deben transformar a parámetros T. De esta forma, la matriz M_i se puede expresar como $M_i = T_{A_i} L_i T_{B_i}$. Sin embargo, esta expresión incluye tanto los efectos de las transiciones como el efecto de la línea. Para solucionar este problema se debe aplicar alguna transformación matemática que consiga eliminar el efecto de las transiciones. Esto se hace midiendo líneas de distinta longitud y utilizando el concepto de invariantes [7]. Desde que se plantease este concepto, varias han sido las estrategias matemáticas para conseguir que aislar el efecto de la línea

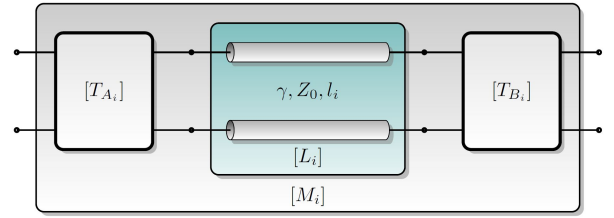


Fig. 4. Bipuertos para la caracterización del sistema.

del de las transiciones. Por un lado, hay estrategias basadas en el cálculo de trazas [8] o determinantes [9] de matrices. Sin embargo, en [10] se demostró que la estrategia más eficiente era la de utilizar métodos basados en autovalores, ya que estos son los menos afectados a errores aleatorios en el analizador. Este es el motivo por el cual en esta contribución se usará un método basado en autovalores. Se parte de las matrices de parámetros T de dos líneas de distinta longitud, $[M_1]$ y $[M_2]$, donde las transiciones son iguales para ambas líneas ($[T_A]$). Estas matrices se pueden combinar siguiendo

$$[M_1][M_2]^{-1} = [T_A][L_1][L_2]^{-1}[T_A]^{-1}. \quad (1)$$

Si se reescriben las matrices $[M]$ y $[L]$ como $[M] = [M_1][M_2]^{-1}$ y $[L] = [L_1][L_2]^{-1}$, entonces (1) se puede expresar como

$$[M] = [T_A][L][T_A]^{-1}. \quad (2)$$

La ecuación (2) es una transformación de semejanza, haciendo que $[M]$ y $[L]$ sean matrices semejantes y que, por tanto, sus autovalores, trazas y determinantes sean iguales. Siendo $\gamma = \alpha + j\beta$ y $\Delta l = l_2 - l_1$, la matriz $[L]$ es una matriz diagonal que se define como

$$[L] = \begin{bmatrix} e^{\gamma\Delta l} & 0 \\ 0 & e^{-\gamma\Delta l} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

y sus autovalores son $\lambda_1 = e^{+\gamma\Delta l}$ y $\lambda_2 = e^{-\gamma\Delta l}$. Como estos autovalores coinciden con los de la matriz $[M]$, la constante de propagación se puede expresar como

$$\gamma = \frac{1}{\Delta l} \ln(\lambda_1) = \frac{1}{\Delta l} \ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right). \quad (4)$$

En la ecuación obtenida se pueden tener dos valores distintos para la constante de propagación, por lo que se puede realizar una promediado de ambos, $1/2(\lambda_1 + 1/\lambda_2)$, de tal forma que la constante de propagación γ se obtenga usando

$$\gamma = \frac{1}{\Delta l} \ln\left(\frac{\lambda_1 + 1/\lambda_2}{2}\right). \quad (5)$$

En este punto es importante mencionar que el método obtenido se aplica sin calibración del analizador, ya que se han eliminado los efectos de las transiciones introduciendo el concepto de invariante. Pese a que esta forma de obtener la constante de propagación sería suficiente en condiciones ideales, lo cierto es que la presencia de errores aleatorios, debidos a la fabricación o al sistema de medición, hacen que la precisión del método sea mejorable. Es por ello que muchos autores han propuesto aumentar el número de líneas con el fin de obtener una caracterización más precisa. En [10] se demostró que dichos errores aleatorios disminuyen según

aumenta el número de líneas. Para mejorar la precisión del método de medida se plantea utilizar un ajuste de mínimos cuadrados, el cual es el estimador de máxima verosimilitud, que resuelva la ecuación

$$\min_{\alpha, \beta} \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \left| \left(\frac{\lambda_1 + 1/\lambda_2}{2} \right) - e^{+\gamma \Delta l} \right|^2, \quad (6)$$

donde N es el número de líneas. Las longitudes de dichas líneas se deben calcular siguiendo un criterio quasi-lineal o logarítmico, como los explicados en [10].

B. Problemática asociada a la conductividad

Una de las premisas de las que parten todos los métodos basados en invariantes es que las líneas son iguales en lo que a fabricación se refiere. Esto quiere decir que tanto sus dieléctricos como sus conductores son homogéneos, presentando las mismas propiedades de permitividad, permeabilidad, tangente de pérdidas o conductividad. El problema radica en que estas propiedades no se pueden garantizar en la estructura planteada. Los dieléctricos se pueden asumir como homogéneos e iguales para todas las líneas [8], al estar fabricados en las mismas condiciones. Sin embargo, la conductividad de los elementos metálicos es más complicada de garantizar. Por un lado, los planos de masa se están metalizando con un spray de cobre, cuya conductividad dependerá de la homogeneidad de la pintura depositada sobre el sustrato. Por otro lado, la pista se está realizando a través de impresión de tinta. Esta impresión requiere un proceso de curado que hace que se evapore el elemento en el que inicialmente se encuentran disueltas las nanopartículas de plata, haciendo que estas queden finalmente depositadas sobre la lámina de impresión y puedan presentar una buena conductividad. La repetibilidad de este proceso es bastante difícil de conseguir. Prueba de ello es la diferencia de la impedancia eléctrica que pueden presentar los distintos conductores en cada una de las líneas. Partiendo de la problemática anterior, y de cara a examinar cómo afecta a los métodos propuestos y a la constante de propagación la diferencia en las conductividades de los materiales, se ha llevado a cabo una simulación en ANSYS HFSS de la estructura propuesta, utilizando materiales metálicos de distinta conductividad. Para ello, se ha fijado la conductividad de los planos de referencia y se ha ido variando la de la pista, y posteriormente se ha hecho de forma inversa, fijando la de la pista y variando la de los planos de masa. Los resultados muestran que el factor más influyente es la conductividad de la pista, afectando significativamente a la constante de propagación. La conductividad de dicha pista provoca mayores variaciones en dicha constante que la del plano de masa, tanto en la constante de atenuación α como en la de fase β . Como se puede ver en la Fig. 5, ambas constantes aumentan su valor cuando la conductividad es menor.

C. Influencia de la conductividad en el método

Uno de los problemas principales que plantea la fabricación mediante impresión de tintas conductoras es la conductividad. Las tintas, una vez impresas, deben ser sometidas al proceso de curado previamente mencionado, el cual consiste en eliminar el líquido en el que las partículas metálicas están disueltas. Este proceso se suele realizar mediante la

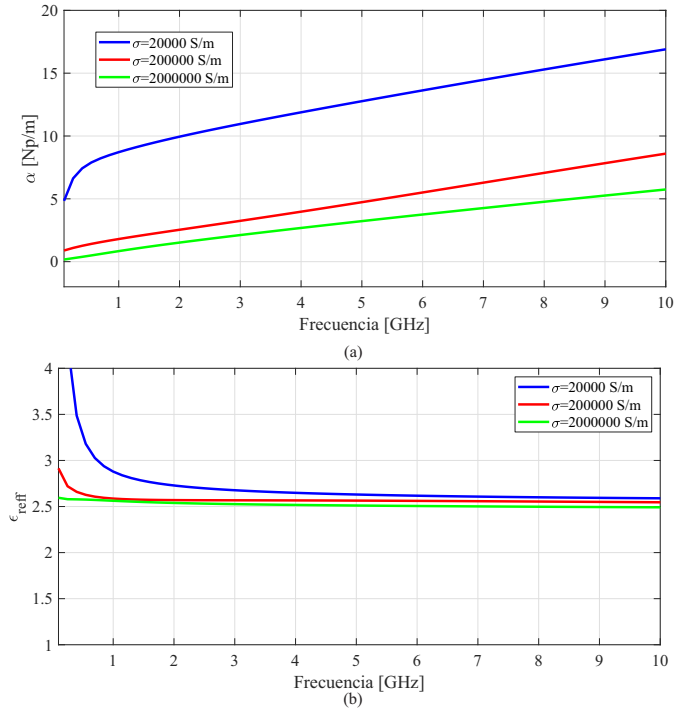


Fig. 5. Simulación en HFSS de la variación de la constante de atenuación (a) y permitividad relativa efectiva (b) en función de la conductividad de la pista.

aplicación de calor o luz durante un tiempo determinado, que suele estar especificado por el fabricante de dicha tinta. Una vez se ha realizado dicho proceso, la tinta queda asentada sobre el sustrato y adquiere la conductividad necesaria. Sin embargo, muchas veces hay factores que pueden hacer que esta conductividad varíe de una pista a otra: el número de pasadas de impresión que se hagan, el tiempo entre dichas pasadas, la manipulación de las pistas o que el curado se pueda realizar correctamente. Todos estos factores hacen que no sea posible, en la práctica, asegurar que la conductividad sea igual en todas las pistas impresas, por lo que tampoco se puede asegurar que las constantes de propagación coincidan. Para estudiar cómo afecta esta diferencia en las constantes de propagación a los métodos propuestos, se plantea que una de las líneas tenga una conductividad menor, por lo que tendrá una constante de propagación mayor, a la que se denominará γ' . Con dicha constante de propagación, la ecuación (3) se puede reescribir como

$$[L] = \begin{bmatrix} e^{\gamma l_2 - \gamma' l_1} & 0 \\ 0 & e^{\gamma' l_1 - \gamma l_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{\gamma \Delta l'} & 0 \\ 0 & e^{-\gamma \Delta l'} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

siendo $\Delta l'_i = l_2 - \xi l_1$ y $\xi = \gamma'/\gamma$. El factor ξ es el cociente entre las constantes de propagación. Dichas constantes son números imaginarios cuya fase es muy próxima a $\pi/2$. Dicho cociente, por tanto, tenderá a ser un número real. Además, se sabe que γ' será mayor que γ al pertenecer a la línea de menor conductividad. Este hecho hará que, además, el cociente sea mayor que 1. Todo ello implica que la variación de longitud equivalente planteada, $\Delta l'_i$, sea distinta a la original. Como se demostró en [10], un error en la longitud de alguna de las líneas se corresponde con una desviación en la solución. Esta desviación será positiva si la línea de menor longitud es la

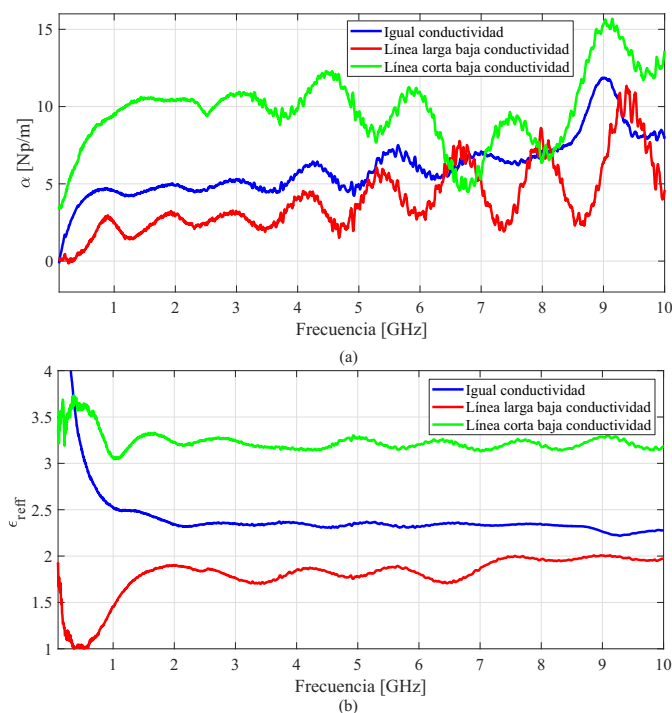


Fig. 6. Resultados experimentales de la constante de atenuación (a) y permitividad relativa efectiva (b) estimada usando líneas de igual o diferente conductividad.

que tiene menor conductividad, mientras que será negativa en caso contrario.

IV. RESULTADOS

Para comprobar la validez del método planteado se han realizado 4 líneas stripline cuyas longitudes son 10, 14.01, 19.22 y 25 mm. Estas dimensiones han sido calculadas siguiendo el criterio quasi-lineal con $q = 1.2$ planteado en [10]. Sin embargo, y para comprobar la validez de la teoría planteada, a una de las líneas se le ha reducido el tiempo de curado, de tal manera que su conductividad sea menor. La Fig. 6 muestra los resultados obtenidos aplicando el método a las 4 líneas de igual conductividad, así como aplicándolo a un par de líneas de distinta conductividad. Como es de esperar, la diferencia de conductividades actúa como una desviación en la solución. Se puede ver que tanto en la constante de atenuación como en la de fase, cuando la línea de menor conductividad es la línea más larga, el desplazamiento es negativo, mientras que cuando es la más corta, el desplazamiento es positivo. Además, se puede ver cómo mejora la precisión del método según se aumenta el número de líneas. Aunque la estructura presenta unas pérdidas elevadas, su funcionamiento es correcto en la banda entre 0.1 y 10 GHz. Por encima de esa frecuencia, el aumento de las pérdidas asociadas a la baja conductividad hace muy complicado que se pueda utilizar esta tecnología para la fabricación de estructuras. Sin embargo, permitividad relativa efectiva sí muestra un buen comportamiento, tendiendo a la nominal del sustrato HIPS, la cual está en torno a 2.45. Esto se debe a que al ser una stripline cerrada, el campo se concentra en el sustrato y la propagación se realiza a través de un modo TEM.

V. CONCLUSIONES

En esta contribución se ha presentado el uso de un método de banda ancha para la caracterización de los parámetros de una línea stripline realizada con fabricación aditiva. Este método, tradicionalmente usado para líneas de transmisión planas sobre sustratos rígidos, permite obtener la constante de propagación en banda ancha. Sin embargo, los resultados del mismo variaban dependiendo de las líneas utilizadas. Tras una serie de comprobaciones se pudo concluir que estas diferencias se debían a la conductividad del conductor impreso, ya que esta es muy variable dependiendo del proceso de curado. Esta variación ha sido caracterizada como un error en la longitud efectiva de las líneas, que se traduce en una desviación en la constante de propagación. Por ello, se puede concluir que es importante realizar el proceso de curado correctamente para poder garantizar que la constante de propagación es igual en todas las líneas y así poder aplicar métodos de caracterización oportunos que permitan extraerla a partir de las medidas.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España, con fondos del proyecto PID2020-116968RB-C31/AEI/10.13039/501100011033, y por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España, con la beca FPU16/00246.

REFERENCIAS

- [1] E. Macdonald et al., "3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics," in *IEEE Access*, vol. 2, pp. 234-242, Dec. 2014, doi: 10.1109/ACCESS.2014.2311810.
- [2] A. Jones, S. Lucyszyn, E. Márquez-Segura, N. Ridler, J. Skinner and D. Stokes, "3-D printed primary standards for calibration of microwave network analysers", *Measurement*, vol. 158, Jul. 2020, [online] Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224120302207>.
- [3] E. García-Marín, E. Márquez-Segura, P. Sánchez-Olivares, J. L. Masa-Campos, J. A. Ruiz-Cruz and C. Camacho-Peñalosa, "Ink-jet Implementation of Stacked-Patch Antenna for Wireless Applications," 2019 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), 2019, pp. 151-153, doi: 10.1109/IMWS-AMP.2019.8880078.
- [4] P. I. Deffenbaugh, T. M. Weller and K. H. Church, "Fabrication and Microwave Characterization of 3-D Printed Transmission Lines," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, no. 12, pp. 823-825, Dec. 2015, doi: 10.1109/LMWC.2015.2495184.
- [5] Datasheet disponible en: <https://www.sigmaaldrich.com/ES/es/product/aldrich/900190>
- [6] B. Bianco and M. Parodi, "Measurement of the effective relative permittivities of microstrip", *Electron. Lett.*, vol. 11, no. 3, pp. 71-72, Feb. 1975.
- [7] J. van Heuven and T. Rozzi, "The Invariance Properties of a Multivalued n-Port in a Linear Embedding," in *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 19, no. 2, pp. 176-183, March 1972, doi: 10.1109/TCT.1972.1083435.
- [8] M. Pérez-Escribano and E. Márquez-Segura, "Parameters Characterization of Dielectric Materials Samples in Microwave and Millimeter-Wave Bands," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 3, pp. 1723-1732, March 2021, doi: 10.1109/TMTT.2020.3045211.
- [9] M. D. Janezic and J. A. Jargon, "Complex permittivity determination from propagation constant measurements," in *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 76-78, Feb. 1999, doi: 10.1109/75.755052.
- [10] M. Pérez-Escribano and E. Márquez-Segura, "Random Errors in Broadband Characterization of the Propagation Constant of Transmission Lines Using Multiple Two-Port Measurements," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 59038-59047, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3073173.