

Caracterización de Sustrato para Stripline a 2.5 [GHz]

Adiel Alexis Rojas Diaz, 261675, adarojasdi@unal.edu.co
 Nestor Javier García Arenas, 261767, njgarciaar@unal.edu.co
 Carlos Andrés Castellanos, 261378, cacastellanosa@unal.edu.co

Resumen—El presente documento es la síntesis de los pasos seguidos para obtener los valores de permitividad relativa y tangente de pérdidas, parámetros eléctricos, del FR-4 como sustrato de una línea stripline a partir de la medición de la línea con un Analizador Vectorial de Redes (VNA). En primer lugar se explica brevemente la teoría involucrada en el proceso y luego se describe la metodología experimental a seguir, acompañada de simulaciones del prototipo y una simulación de validación, por último se muestran y analizan los resultados prácticos. Dentro de la parte metodológica se explican dos métodos, usando las matrices de transmisión o ABCD y de distribución o S, que se pueden usar en conjunto para llegar a una buena aproximación y se muestran sus alcances por medio de simulaciones. Finalmente se presentan los resultados de su aplicación física y el análisis de estos.

Index Terms—Stripline, Sustrato, FR-4, Permitividad relativa, Tangente de pérdidas, Matriz S, Parámetros de transmisión, VNA.

I. INTRODUCCIÓN

EN este artículo se ilustran dos métodos para la medición de los parámetros eléctricos de un sustrato, estos métodos son aplicados a las líneas stripline aunque podrían ser usados también para cualquier otro tipo de línea capaz de operar en el rango de frecuencia de entre 2 y 3 [GHz]. Los métodos descritos se justifican con suficientes bases teóricas y dos simulaciones a las que se llega por medios distintos medios.

En el presente informe se analiza la implementación de los métodos sobre una línea real y se presenta un análisis de dichos resultados, que aunque no vienen de una implementación adecuada son capaces de evidenciar los errores cometidos en dicha fase. Aunque, como se dijo, los resultados no permiten concluir con certeza la fiabilidad del método, permiten hacer un sumario de los errores que se podrían cometer en la construcción de una línea stripline.

II. MARCO TEÓRICO

II-A. Stripline[1]

La stripline es una línea de transmisión plana que consta de un conductor central plano protegido rodeado de un dieléctrico, sustrato, de espesor constante y rodeado por un blindaje conductor conectado a tierra, como se ve en la Fig. 1.

Este tipo de línea permite la propagación de ondas TEM y por tanto su constante de propagación está dado por

$$\beta = k = \omega\sqrt{\mu\epsilon} = 2\pi f \frac{\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}{c} \approx 2\pi f \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} \quad (1)$$

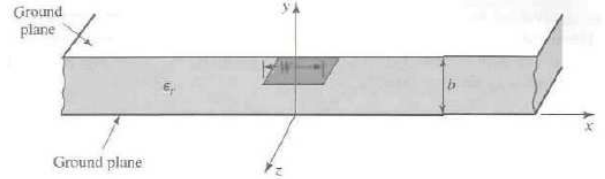


Figura 1. Geometría de una línea Stripline. [1]

donde c es la velocidad de la luz en el vacío.

Además de la fórmula para β también están las siguientes fórmulas para hallar demás parámetros de la línea:

1. Impedancia Característica

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{b}{We + 0,441b} \quad (2)$$

donde We es el ancho efectivo de la línea, definido por

$$\frac{We}{b} = \frac{W}{b} - \begin{cases} 0 & \frac{W}{b} > 0,35 \\ (0,35 - \frac{W}{b})^2 & \frac{W}{b} < 0,35 \end{cases}$$

2. Pérdidas Dieléctricas

$$\alpha_d = \frac{k \tan \delta}{2} \quad (3)$$

3. Pérdidas de Conducción

$$\alpha_c = \begin{cases} \frac{2,7 \times 10^{-3} R_s \epsilon_r Z_0}{30\pi(b-t)} A & \sqrt{\epsilon_r} Z_0 < 120 \\ \frac{0,16 R_s}{Z_0 b} B & \sqrt{\epsilon_r} Z_0 > 120 \end{cases} \quad (4)$$

donde A y B son respectivamente

$$A = 1 + \frac{2W}{b-t} + \frac{1}{\pi} \frac{b+t}{b-t} \ln \left(\frac{2b-t}{t} \right)$$

$$B = 1 + \frac{b}{0,5W + 0,7t} \left(0,5 + \frac{0,414t}{W} + \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{4\pi W}{t} \right) \right)$$

y R_s es la resistencia superficial del conductor dada por

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} = \sqrt{\frac{\mu_0\pi f}{\sigma}} \quad (5)$$

II-B. Caracterización de Líneas de Transmisión a partir de Parámetros S [2]

Al medir una línea de transmisión con un Analizador Vectorial de Redes se obtiene la matriz S de dicha línea, con los que se deben obtener los parámetros desconocidos de la línea (constante de propagación e impedancia característica). Para obtener una adecuada descripción de la línea se debe conocer su longitud y la impedancia característica de las líneas

de medición. Teniendo estos datos se usan las fórmulas enunciadas a continuación para obtener los valores desconocidos, estas fórmulas se obtienen a partir del despeje de los valores de las ecuaciones circuitales y parámetros S de la línea conectada entre los terminales de medición del VNA.

$$e^{-\gamma l} = \frac{S_{21}}{2}(A+1) - \frac{(S_{11}-1)(S_{11}+S_{11}A-A+1)}{2S_{21}} \quad (6)$$

$$Z_c = Z_{ref} A \quad (7)$$

En las anteriores ecuaciones la constante de propagación se representa por $\gamma=\alpha+j\beta$ y la impedancia característica de las líneas de medición por Z_{ref} . El coeficiente A incluido en las ecuaciones se obtiene por

$$A = \sqrt{\frac{-S_{11}^2 - 2S_{11} + S_{21}^2 - 1}{-S_{11}^2 + 2S_{11} + S_{21}^2 - 1}} \quad (8)$$

De sea forma la constante de propagación se obtiene por

$$\gamma = \frac{-\ln(e^{-\gamma l}) + 2n\pi}{l} \quad (9)$$

Donde n es un entero que representa la cantidad de medias oscilaciones que completa la onda en la línea, este número debe ser hallado conociendo o aproximando el comportamiento de la constante de fase (parte imaginaria de la constante de propagación) respecto a la frecuencia y de esa forma incrementar n hasta llegar a una gráfica de la constante de fase contra frecuencia que se ajuste al comportamiento predicho. En líneas TEM, como es el caso de la stripline, la gráfica de β debe cortar en cero el eje de frecuencia, es decir que debe ser linealmente dependiente de la misma.

Habiendo calculado $\gamma=\alpha+j\beta$ se pueden obtener los parámetros eléctricos del sustrato. La permitividad relativa se obtiene a partir de la constante de fase como sigue

$$\epsilon_r = \left(\frac{c\beta}{\omega}\right)^2 \quad (10)$$

donde ω es la frecuencia angular. Teniendo ϵ_r la tangente de pérdidas se obtiene por medio de la constante de atenuación como

$$\tan \delta = 2 \frac{\alpha_d}{k} = 2 \frac{\alpha - \alpha_c}{\beta} \quad (11)$$

en donde α_c se obtiene por (4).

La matriz S de una línea con pérdidas es

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{Z_L - Z_{ref}}{Z_L + Z_{ref}} & \frac{2(1+\Gamma)}{(e^{j\beta l} + \Gamma e^{-j\beta l}) \left(1 + \frac{Z_{ref}}{Z_L}\right)} \\ \frac{2(1+\Gamma)}{(e^{j\beta l} + \Gamma e^{-j\beta l}) \left(1 + \frac{Z_{ref}}{Z_L}\right)} & \frac{Z_L - Z_{ref}}{Z_L + Z_{ref}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde Z_L es la impedancia vista desde un puerto

$$Z_L = Z_c \frac{1 + \Gamma e^{-2\gamma l}}{1 - \Gamma e^{-2\gamma l}}$$

Y Γ es el coeficiente de reflexión en cada puerto, dado por

$$\Gamma = \frac{Z_{ref} - Z_c}{Z_{ref} + Z_c}$$

II-C. Caracterización de Líneas a partir de la Matriz ABCD

Este método es una variación del método descrito en II-B, el método usa las ecuaciones (10) y (11) para los parámetros eléctricos de la línea pero los calcula a partir de la matriz ABCD de una línea con pérdidas, mostrada en (13).[3]

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_c} & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \quad (13)$$

De forma que la impedancia característica y la constante de propagación de la línea se extraen por (14) y (15) respectivamente.

$$Z_c = \sqrt{B/C} \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{\text{arccosh}(A) + 2n\pi}{l} = \frac{\text{arccosh}(D) + 2n\pi}{l} \quad (15)$$

Donde n tiene el mismo significado físico que en (9).

III. METODOLOGÍA

III-A. Técnica de Medición

El VNA hace un barrido de frecuencia y entrega los valores de magnitud (en [dB]) y fase (en [°]) de cada elemento de la matriz S de la red formada por las líneas de medición en cascada con la línea, estos datos deben estar expresados como números complejos, el proceso de transformación de unidades se explica en (16). Por esta razón primero se debe pasar por la matriz ABCD de la medición y de la conexión en cascada de los elementos de medición sin el prototipo, de esa forma se obtiene la matriz ABCD de cada terminal de medición y así se obtiene la matriz S del prototipo, la obtención de la matriz ABCD de calibración se ilustra en (17) y la del prototipo en (18); en dichas fórmulas la matriz de subíndice “con” es la matriz ABCD de la conexión de los terminales de medición en cascada, la matriz de subíndice “med” es la obtenida la medir el prototipo conectado entre los terminales de medición y la matriz de subíndice “prot” es la que se desea obtener, la matriz de transmisión de la línea.

$$S_{mn} = |S_{mn}| \angle \arg S_{mn} \quad (16)$$

$$= 10^{\frac{|S_{mn}|_{dB}}{20}} [\cos(\arg S_{mn}) + j \sin(\arg S_{mn})]$$

$$\begin{aligned} ABCD_{con} &= ABCD_{cal} ABCD_{cal} \\ &\Downarrow \\ ABCD_{cal} &= \sqrt{ABCD_{con}} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} ABCD_{med} &= ABCD_{cal} ABCD_{prot} ABCD_{cal} \\ &\Downarrow \\ ABCD_{prot} &= ABCD_{cal}^{-1} ABCD_{med} ABCD_{cal}^{-1} \end{aligned} \quad (18)$$

La transformación entre matrices de transmisión y distribución (S) se muestra en (19) y (20).

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1+S_{11})((1-S_{12})+S_{12}S_{21})}{2S_{21}} & \frac{(1+S_{11})((1+S_{12})-S_{12}S_{21})}{2S_{21}} \\ \frac{(1-S_{11})((1-S_{12})-S_{12}S_{21})}{2S_{21}} & \frac{(1-S_{11})((1+S_{12})+S_{12}S_{21})}{2S_{21}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{A+B/Z_0-CZ_0-D}{A+B/Z_0+CZ_0+D} & \frac{2(AD-BC)}{A+B/Z_0+CZ_0+D} \\ \frac{2}{A+B/Z_0+CZ_0+D} & \frac{-A+B/Z_0-CZ_0+D}{A+B/Z_0+CZ_0+D} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Una vez obtenidos ambos tipos de parámetros para cada frecuencia se analizan con los métodos descritos en II-B y II-C.

El VNA fue usado para hacer un barrido de frecuencia de 2 [GHz] a 3 [GHz] con sondas de impedancia característica 50 [Ω]

Se adjuntan al informe los scripts de MATLAB usados para cada etapa, el nombre de cada archivo se encuentra indicado en cada etapa. El archivo usado para la medición del prototipo es: AnalisisLinea.m.

III-B. Prueba de propagación de error y simulación del prototipo

Para la simulación del prototipo construido se usó el archivo: PrediccionLinea.m. El script hace los cálculos reseñados en II-A sobre vectores que recorren el rango de incertidumbre para cada valor, espesores y parámetros eléctricos y con estos valores calcula las matrices de transmisión y distribución para el rango de valores calculados para recalculer el rango de valores para parámetros eléctricos con sus respectivas incertidumbres, esto es una medida de la incertidumbre de cada método.

Esta simulación arrojó los datos descritos en las Figuras 2 y 3.

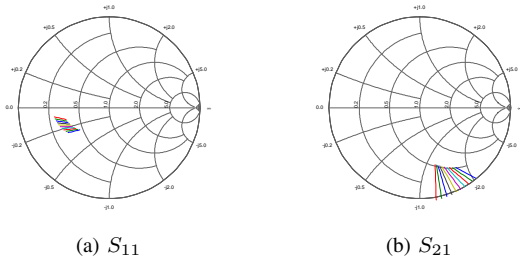
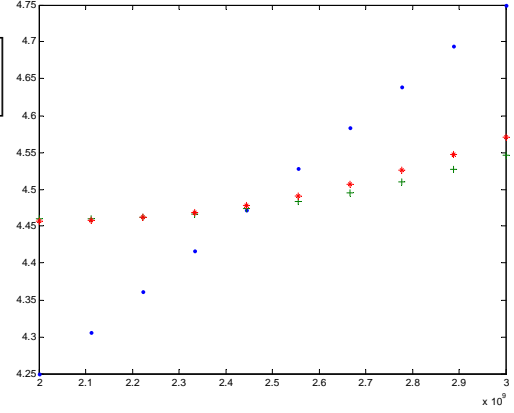


Figura 2. Rango de valores esperados para los parámetros S.

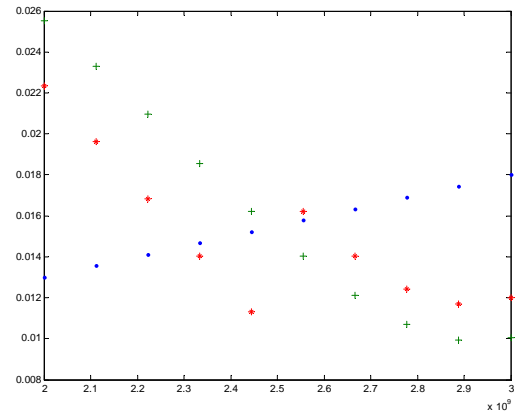
Para la tangente de pérdidas se debió sumar 0.015 para que los valores calculados coincidieran con el rango de valores supuestos. Este ajuste se mantiene en el resto de los resultados.

El prototipo es una línea de transmisión con valores:

- Espesor del dieléctrico: $b=1,83$ [mm]
- Espesor del cobre: $t=33$ [μm]
- Ancho de camino: $W=2,32$ [mm]
- Longitud de la línea: $l=9,81$ [mm]



(a) ϵ_r



(b) $\tan \delta$

Figura 3. Rango de valores esperados para los parámetros eléctricos. Los valores supuestos están representados por puntos, los calculados con la matriz S por cruces y los calculados con la matriz ABCD con asteriscos.

III-C. Validación de la técnica de medición con datos simulados

El método de medición también se comprobó con valores de simulación de una línea de características:

- Espesor del dieléctrico: $b=2$ [mm]
- Ancho de camino: $W=4$ [mm]
- Longitud de la línea: $l=100$ [mm]

La simulación también fue realizada dentro de los parámetros usados en la medición. EL script usado para analizar dichos datos fue: AnalisisLineaSimulada.m. El análisis de los datos dio como resultados las gráficas mostradas en las Figuras 4 y 5.

IV. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN

El análisis de las mediciones resultó en las gráficas de las Figuras 6 y 7.

V. CONCLUSIONES

La alta concordancia entre los valores teóricos y las predicciones y simulaciones es una muestra de la fiabilidad de las suposiciones, esto contrasta con los resultados reales, que

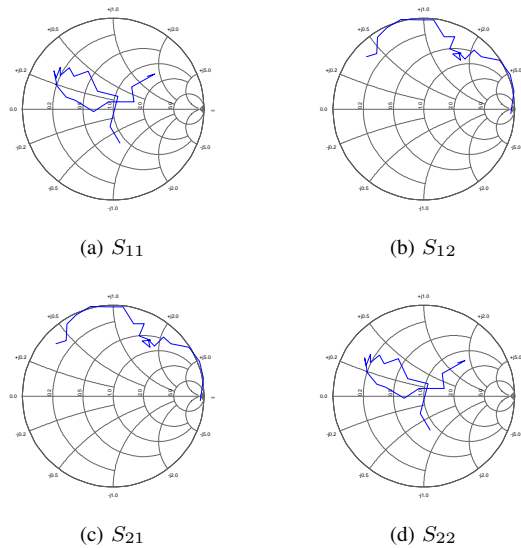


Figura 4. Gráfica de los parámetros S obtenidos de la simulación.

se alejan bastante de lo esperado. El método además de ser válido teóricamente es muy preciso en el rango de frecuencias manejado en esta práctica para la permitividad relativa aunque no pase lo mismo con la tangente de pérdidas, aunque es preciso de todos modos.

Una posible causa de los resultados obtenidos podría ser una mala construcción del prototipo. El cual tenía un excedente de soldadura que dejaba un espacio de aire sobre la pista y la cubría por completo. También carecía de un plano de tierra que pudiera cubrir el borde de la línea; los planos de tierra también estaban desplazados respecto al otro, lo que permite la refracción de los campos y su “escape” hacia el aire modificando la transversalidad de la propagación. Como último defecto de construcción del que nos pudimos dar cuenta está el que la línea tuviera pequeños (apenas visibles) trozos de cobre cerca de la pista, en un solo lado y concentrados hacia uno de los extremos, lo que posiblemente causó la direccionalidad de la propagación que se evidencia en la falta de simetría de la matriz de distribución.

Lo anterior es útil al advertir los posibles errores que puede cometer un novato al construir líneas en PCB y en particular de tipo stripline.

REFERENCIAS

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 1998.
- [2] J. L. Araque, “Computation of transmission line parameters from complex reflection and transmission coefficients,” Oct 2011.
- [3] S. I. S. Hassan, “Chapter 2 : Network parameters.” Engineering Campus USM School of Electric & Electronic Eng.

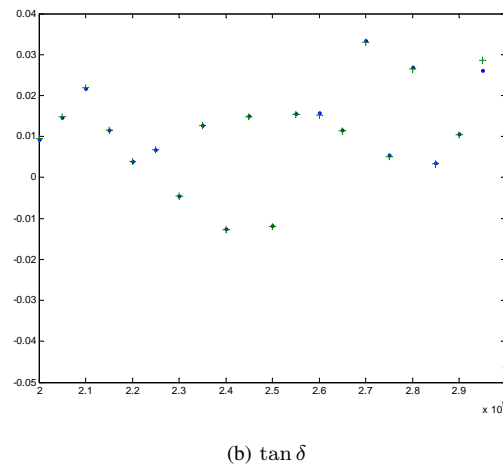
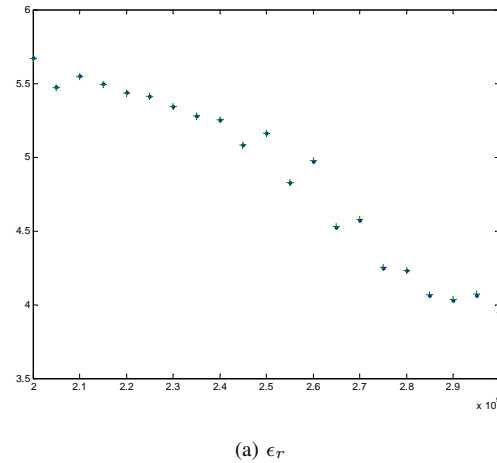


Figura 5. Gráficas de los parámetros eléctricos obtenidas de la simulación. Los puntos representan los valores obtenidos con la matriz S y la cruces los obtenidos con la matriz ABCD.

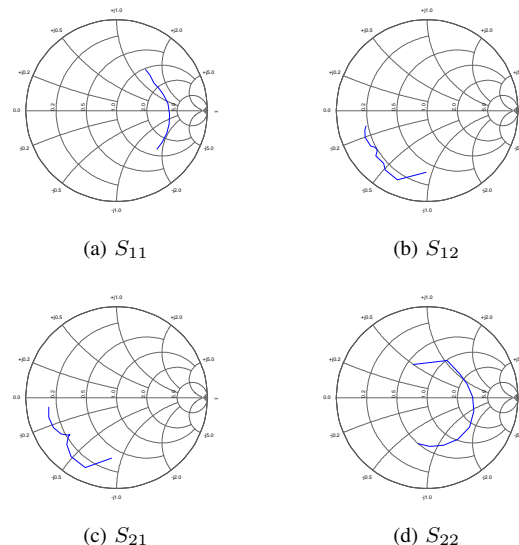


Figura 6. Gráficas de los parámetros S de del prototipo.

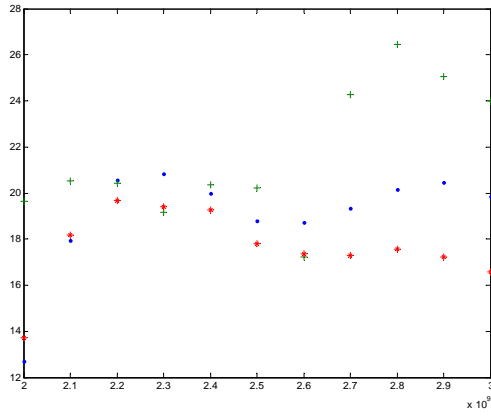
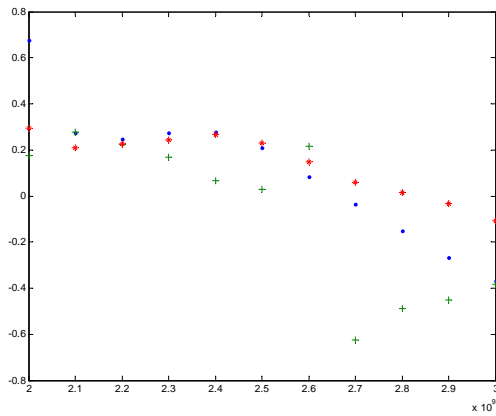
(a) ϵ_r (b) $\tan \delta$

Figura 7. Gráficas de los parámetros eléctricos de del prototipo. Los puntos representan los valores obtenidos con la primera columna de la matriz S, las cruces los obtenidos con la segunda columna y los asteriscos los calculados con la matriz ABCD.