

# Analizador de Redes Multipuerta y su Aplicación a la Caracterización de Materiales Quirales

José Margineda Puigpelat<sup>(1)</sup>, Gregorio J. Molina-Cuberos<sup>(1)</sup>, Ángel J. García-Collado<sup>(2)</sup>,  
Ernesto Martín Rodríguez<sup>(1)</sup>, Juan Muñoz Madrid<sup>(1)</sup>

jmargi@um.es, gregomc@um.es, ajgarcia@ucam.edu, ernesto@um.es, juanmu@um.es

<sup>(1)</sup> Dpto. de Electromagnetismo y Electrónica,

Universidad de Murcia, Campus de Espinardo, Fac. Química, 30100 Murcia.

<sup>(2)</sup> Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Aplicadas (GRITA),

Universidad Católica San Antonio, 30107, Murcia.

**Abstract-** A multiport network analyzer using fixed electric probes for characterizing chiral materials is proposed. The system is based on a previous five-port junction and modified by adding a new probe in the perpendicular plane. The new dual 5-port allows measuring the reflection coefficient and the two polar transmission coefficients (for polarization parallel and perpendicular to incident wave). The theory of five-port analyzer network is revisited and the modifications for chiral measurement are presented. The first results of the rotation angle produced by different structures are also presented and a comparison with the results obtained with a conventional system is shown.

## I. INTRODUCCIÓN

El analizador automático de redes (ANA) es actualmente un dispositivo indispensable en cualquier laboratorio de medida de Microondas. Permite medir los parámetros S (o equivalentes) de cualquier dispositivo de dos o más puertos. El estudio y desarrollo de estos dispositivos se inicia en la década de los 60 del siglo pasado. La evolución de la Electrónica ha permitido mejorarlo en prestaciones, aumentar su sensibilidad y sobre todo ampliar el rango de frecuencias llegando ya a las bandas de los terahercios. Dos tipos de analizadores han sido desarrollados: los que utilizan detección por fase y los multipuerta. Los primeros miden la señal reflejada y transmitida en referencia a la incidente, tanto en amplitud como en fase. Los segundos miden ambas señales pero sólo en amplitud y la información completa se obtiene con un adecuado tratamiento de los datos experimentales.

Los ANA que pueden encontrarse comercialmente son usualmente del primer tipo [1-3] y permiten medidas en banda ancha y con gran precisión. Los multipuerta no han tenido un éxito comparable desde el punto de vista comercial, pero presentan la ventaja de ser mucho menos costosos y muy fáciles de fabricar, por lo que suele ser una buena solución para montajes propios en cualquier laboratorio [4]. Se utilizan principalmente en la caracterización de materiales.

Nuestro grupo desarrolló en los pasados ochenta un analizador multipuerta basado en pruebas fijas [5, 6].

Actualmente estamos desarrollando una modificación adecuada para determinar actividad electromagnética, efecto típico de los materiales quirales. En este trabajo hacemos una revisión del principio básico del multipuerta para centrarnos después en esta última aplicación. Presentamos también los primeros resultados que confirman la validez del dispositivo para medir cambios de polarización.

## II. MULTIPUERTA DE 5 PRUEBAS FIJAS: PRINCIPIOS BÁSICOS

En la Fig. 1 se muestra un esquema del analizador formado por dos uniones 5-puertas. El dispositivo puede ser construido sobre los soportes típicos de microondas: línea de transmisión, microstrip, guía de ondas,...

### A. Medida del parámetro $S_{11}$

Sabemos que el parámetro  $S_{11}$  coincide con el coeficiente de reflexión,  $\Gamma_1 = \rho_1 e^{j\phi_1}$ , en la puerta 1 del dispositivo a medir (DUT) cuando la 2 está adaptada. El campo que detecta cada una de las pruebas del 5-puertas 1, es [6]

$$E_i = E_0 [\exp(-j\beta z_i) + \Gamma_1 \exp(j\beta z_i)] \quad (1)$$

Donde  $E_0$  es el campo incidente,  $z_i$  la posición de la prueba, todos ellos referidos a plano de referencia A ( $z = 0$ ) y  $\beta$  la constante de propagación en el 5-puertas 1.

Si conectamos a cada prueba un detector de ley cuadrática, la lectura valdrá,

$$L_i = K |E_i|^2 = C_i [1 + \rho_1^2 + 2\rho_1 \cos(2\beta z_i + \phi_1)] \quad (2)$$

donde el parámetro  $C_i$  depende únicamente de la respuesta en frecuencia de la prueba y puede ser medido en condiciones de "carga adaptada" en plano A, es decir,  $\rho = 0$ .

Si definimos las lecturas normalizadas como

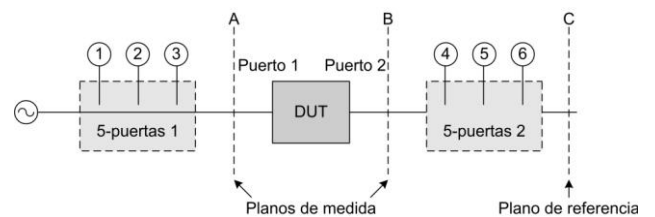


Fig. 1. Circuito básico del analizador de redes 5-puertas.

$$l_i = L_i / C_i = 1 + \rho_1^2 + 2\rho_1 \cos(2\beta z_i + \phi_1) \quad (3)$$

obtenemos un sistema de ecuaciones para  $k = 1, j = 2, 3$  o cualquier combinación,

$$l_k - l_j = A_{kj} X_1 - B_{kj} Y_1 \quad (4)$$

siendo  $X_1 = \rho_1 \cos \phi_1$ ,  $Y_1 = \rho_1 \sin \phi_1$  y

$$A_{kj} = 2 \left[ \cos(2\beta z_k) - \cos(2\beta z_j) \right]$$

$$B_{kj} = -2 \left[ \sin(2\beta z_k) - \sin(2\beta z_j) \right]$$

El coeficiente de reflexión puede ser fácilmente calculado resolviendo estas ecuaciones.

### B. Medida del parámetro $S_{21}$

El parámetro  $S_{21}$  se mide comparando las señales en una de las puertas del 5-puertas 2 en dos situaciones experimentales distintas: conexión directa entre los dos 5-puertas ("Thru", sin DUT) y conexión a través del DUT. Si llamamos  $L_{th,i}$  y  $L_{D,i}$  ( $i = 4, 5$  ó  $6$ ) respectivamente a ambas señales, resulta

$$|S_{21}| = \sqrt{\frac{L_{D,i}}{L_{th,i}}} = \sqrt{l_i} \quad \text{para } i = 4, 5 \text{ ó } 6 \quad (5)$$

Para medir la fase de  $S_{21}$  se necesita alimentación simultánea en ambas puertas del DUT como ya mostraron Engen y Hoer [7-9], aunque para muchas aplicaciones de caracterización de materiales es un dato no necesario.

### C. Medida de los parámetros $S_{22}$ y $S_{12}$

El procedimiento para la medida de  $S_{22}$  es el mismo que el de  $S_{11}$  pero alimentando por la puerta 2 y usando el 5-puertas 2 en lugar del 5-puertas 1. Existe una alternativa descrita en [6] que permite medir  $S_{22}$  manteniendo la alimentación por la puerta 1.

Para la medida de  $S_{12}$  se necesita también alimentación por la puerta 2 e intercambiando el papel del 5-puerta 2 por el 5-puertas 1.

## III. MULTIPUERTA DE PRUEBAS FIJAS PARA CARACTERIZACIÓN DE QUIRALES

### A. Dispositivo experimental

Para la caracterización de materiales quirales es necesario cuantificar la modificación de la polarización de una onda linealmente polarizada que se transmite a través del material. Para ello, hay que medir la señal transmitida, por lo menos, en dos polarizaciones distintas, es decir, hay que medir el parámetro  $S_{21}$  para la polarización copolar,  $S_{21co}$ , y para la polarización cruzada,  $S_{21cr}$  [10].

Este requerimiento complica la medida experimental, especialmente cuando se desea medir en guía de ondas. La solución más obvia es medir en dos posiciones distintas de la guía cambiando el plano donde se sitúa el detector [11, 12], lo que obliga a hacer una desconexión-conexión (girando el tramo con el detector de transmisión). Otra alternativa es diseñar un dispositivo que permita el giro de la guía alrededor de su eje [10]. El multipuerta aquí presentado permite una solución mucho más sencilla facilitando la medida: consiste en añadir una (o varias) pruebas situadas en un plano perpendicular a las iniciales permitiendo obtener información de la señal transmitida en el mismo plano que la incidente (copolar) y en el plano perpendicular (cruzada). En

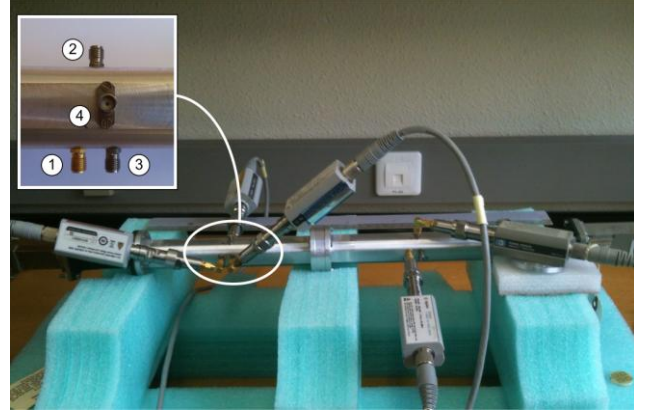


Fig. 2. Fotografía del analizador multipuerta para caracterización de materiales quirales.

la parte superior izquierda de la Fig. 2 puede observarse el multipuerta construido en guía de sección circular de 23,20 mm de diámetro. Las pruebas tienen 0,25 mm de diámetro y penetran 1,6 mm en la guía. Las pruebas 1, 2 y 3 están separadas 6,53 mm y la cuarta, en el plano perpendicular, está a 3,0 mm de la 3. Estas distancias son las adecuadas para evitar ambigüedades en la banda de funcionamiento y consiguiendo una incertidumbre en el módulo de los parámetros  $S < 0.02$  [6].

Este dispositivo y otro exactamente igual sustituyen a los 5-puertas 1 y 2 de la Fig. 1. Hay que hacer notar que con las nuevas uniones modificadas la numeración de la pruebas se ve alterada respecto a la indicada en la Sección II. Las pruebas 1-4 corresponden a la unión 1 y las pruebas 5-8 corresponden a la unión 2.

Con el objetivo de facilitar las conexiones una de las pruebas copolares se coloca en el otro lado de la guía pero manteniendo el plano de polarización. La Fig. 2 muestra el montaje experimental completo con los dos reflectómetros 5-puebas modificados con los sensores de potencia utilizados. Hay que señalar que cada reflectómetro tiene ahora 6 puertas, pero no corresponde a una estructura de analizador de 6-puertas.

El sistema se completa con un sintetizador para la alimentación, un portamuestras, que no es más que un pequeño tramo de guía donde se ubica la muestra a medir (en la fotografía, puede verse entre los dos elementos 5-puertas) y los elementos necesarios para la calibración: carga adaptada, cortocircuitos, etc. La banda de frecuencia de operación del dispositivo construido es la banda X determinada básicamente por la guía utilizada, cuyo modo fundamental es el  $TE_{11}$ . Sin embargo, a partir de 9,8 GHz puede aparecer el modo  $TM_{01}$ .

### B. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental sigue las pautas de cualquier analizador multipuerta: en primer lugar se realiza una toma de datos con estándares conectados (calibración) y en segundo lugar se realiza otra toma de datos con el DUT conectado. El uso de pruebas fijas simplifica el proceso de calibración debido básicamente a que cada una de las pruebas es un acoplador direccional con el mismo factor de acoplamiento para la onda incidente y la reflejada. Así, el proceso de calibración se limita a la medida de las posiciones de las pruebas  $z_i$  y a la medida de la respuesta de cada una de

ellas (parámetros  $C_i$  y  $L_{Di}$ ). Entonces el procedimiento de medida sería el siguiente:

1. Medida de  $z_i$ . Se puede realizar mecánicamente o electromagnéticamente: colocando un cortocircuito en el plano A, un ajuste de las posiciones de los mínimos en función de la frecuencia permite obtener los valores de  $z_i$  para las pruebas coplanares del 5-puerta 1. Para obtener la posición de la prueba cruzada es necesario repetir el proceso después de girar  $90^\circ$  el 5-pruebas 1 (alrededor de su eje longitudinal). Un procedimiento similar se aplica al 5-puertas 2. Es fácil determinar estos parámetros con una incertidumbre menor que 0.1 mm que incide en una incertidumbre en la fase menor de  $1^\circ$ . Este proceso sólo es necesario realizarlo una vez para cada unión multipuerta, ya que las variaciones de  $z_i$  sólo pueden ser debidas a dilataciones mecánicas debidas a variaciones de temperatura, muy pequeñas en un laboratorio.
2. Medida de  $C_i$  y  $L_{th,i}$ . Con el dispositivo esquematizado en la Fig. 1 en disposición “thru” (¡sin DUT!) y una carga adaptada en el plano C, las lecturas obtenidas en cada una de las pruebas coplanares son las magnitudes deseadas. Lógicamente las lecturas de las pruebas cruzadas son cero. Para obtener el parámetro correspondiente a la prueba cruzada del 5-pruebas 2,  $L_{th,cr}$  es necesario realizar una nueva medida en las mismas condiciones después de haber girado  $90^\circ$  el 5-puertas 2. La lectura de la prueba cruzada 1 no es necesaria ya que no hay reflexión cruzada [10]. Todas estas magnitudes son almacenadas en un archivo.
3. Finalmente con el DUT en posición, se toman las lecturas de todas las pruebas  $L_i$  para la pruebas del 5-puerta 1 y  $L_{D,i}$  y  $L_{D,cr}$  que se almacenan en otro archivo de datos.
4. La aplicación de los algoritmos descritos en la Sección II permite calcular  $S_{11}$  y  $|S_{21co}|$ . De forma similar se puede calcular  $|S_{21cr}|$ :

$$|S_{21cr}| = \sqrt{\frac{L_{D,cr}}{L_{th,cr}}} \quad (6)$$

Para obtener  $S_{22}$ ,  $|S_{12co}|$  y  $|S_{21cr}|$  seguiríamos un proceso similar alimentando por la puerta 2. Si se desea medir las fases de los parámetros de transmisión es necesario medir con alimentación simultánea en ambas puertas, como ya se indicó en la Sección II, sin embargo, ni una ni otra cosa ha sido necesario por ahora, ya que nuestro objetivo en este trabajo es mostrar la utilidad del 5-puertas modificado para medidas en quirales.

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La Fig. 3 presenta las muestras analizadas: FR4 corresponde a una sección circular de sustrato sin metalizaciones, mientras que M1, M2 y M3 contienen metalización en una de las caras. La primera (FR4) es una muestra de dieléctrico normal y no debería producir ningún cambio en la polarización y las tres últimas han sido elegidas por cambiar la polarización de la onda transmitida, aunque no sean propiamente quirales.

La Fig. 4 muestra los resultados preliminares del ángulo de rotación en función de la frecuencia, calculado como:

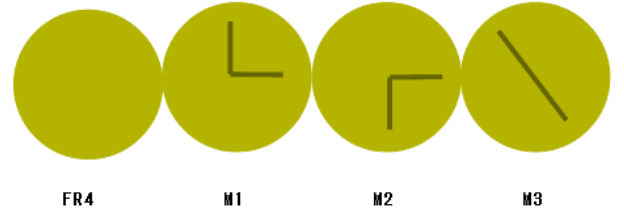


Fig. 3. Esquema de las muestras realizadas en este trabajo.

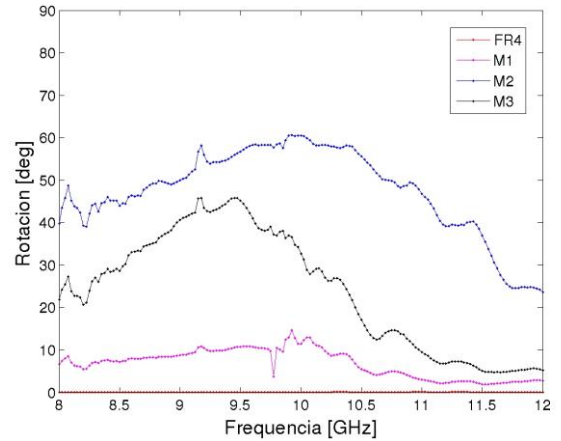


Fig. 4. Giro producido por las muestras FR4, M1, M2 y M3.

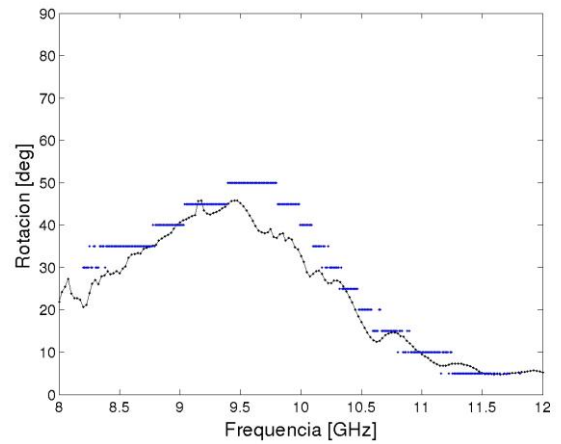


Fig. 5. Giro producido por la muestra M2 determinado en este trabajo (línea oscura) y mediante el sistema descrito en [13] (en azul).

$$\theta = \tan^{-1} \frac{S_{21,cr}}{S_{21,co}}$$

Como cabría esperar, la muestra FR4 no produce ningún efecto sobre la señal incidente, mientras que el resto de las estructuras producen una componente transversal en el campo eléctrico y, por tanto, un cambio en la polarización de la señal incidente. En principio, este cambio podría atribuirse a efectos de tipo dispersivo o quirales. Dada la geometría planar de las estructuras, es de esperar efectos puramente dispersivos. En cualquier caso, en este trabajo no estamos interesados en discernir entre ambos, tan sólo en mostrar que nuestro dispositivo es capaz de detectar y medir cambios en la polarización de la señal incidente.

Para conocer la fiabilidad de las medidas realizadas, hemos comparado los resultados con los obtenidos con un sistema experimental convencional. Es decir, un sistema en guía que permite la determinación del ángulo de rotación mediante el giro de una transición circular-rectangular y un ANA comercial [13]. La Fig. 5 muestra los resultados obtenidos por ambos métodos para M2. Como se puede observar, hay un buen acuerdo entre ambos, a pesar de que no se han tenido en cuenta efectos debidos a la diferencia de fase en los coeficientes de transmisión ni a la estructura de campos del modo  $TE_{11}$ .

#### V. CONCLUSIONES

Se presenta un analizador de redes multipuerta basado en pruebas fijas que permite medir en polarización copolar y cruzada y, por lo tanto, aplicable a medidas de caracterización de materiales quirales, evitando así la necesidad de girar el detector de transmisión en cada medida. El dispositivo se ha construido a partir de un 5-puertas con pruebas fijas convencional, añadiendo una puerta más situada en un plano perpendicular a las anteriores. Se describe la modificación del proceso experimental y se presentan resultados que muestran la viabilidad del dispositivo.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (TEC2010-21496-C03-02) y por fondos FEDER.

#### REFERENCIAS

- [1] J. P. Dunsmore, *Handbook of Microwave Component Measurements: with Advance VNA Techniques*, Ed. J. Wiley, 2012.
- [2] Agilent, Agilent Network Analyzer Basic, Application Note 5965-7917E, [www.agilent.com/find/na](http://www.agilent.com/find/na), 2004.
- [3] M. Hiebel, *Fundamentals of Vector Network Analysis*, Ed. Rohde-Schwartz, Munich, 2008.
- [4] F.M. Ghannouchi, A. Mohammadi, *The six-port technique with microwave and wireless applications*, Ed. Artech House, 2009.
- [5] E. Martín, J. Margineda, J.M. Zamarro, "An automatic network analyzer using a slotted line relectometer" *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-30, n° 5, May 1982, pp. 667-670.
- [6] J. Muñoz, J. Margineda, E. Martín, M. Rojo, "Dual five-port analyzer using fixed probes" *IEEE Trans. Instrum.Meas.*, vol. IM-43, n° 3, June 1994, pp. 415-420.
- [7] G.F. Engen, "The six-port reflectometer: an alternative network analyzer" *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-25, n° 12, Dec 1977, pp. 1075-1080.
- [8] C.A. Hoer, "A network analyzer incorporating two six-port reflectometers" *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-25, n° 12, Dec 1977, pp. 1070-1074.
- [9] G.F. Engen, C.A. Hoer, "Thru\_Reflect-Line: an improvement technique for calibrating the dual six-port automatic network analyzer" *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-27, n° 12, Dec 1979, pp. 987-993.
- [10] J. Margineda, G.J. Molina-Cuberos, M.J. Núñez, A.J. García-Collado and E. Martín, "Electromagnetic Characterization of Chiral Media", in *Solutions and Applications of Scattering, Propagation, Radiation and Emission of Electromagnetic Waves*, edited by Ahmed Kishk, InTech, 2012.
- [11] C.R. Brewitt-Taylor, P.G. Lederer, F.C. Smith, S. Haq, "Measurements and prediction of helix-loaded chiral composites", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Vol. 47, No. 4, April 1999, pp. 692-700.
- [12] G. Busse, J. Reinert, A.F. Jacob, "Waveguide characterization of chiral material: Experiments" *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-47, n° 3, March 1999, pp. 297-301.
- [13] Á. J. García-Collado J. Margineda, E. Martín, G. J. Molina-Cuberos, M. J. Núñez, "Estudio experimental de inserciones metálicas quirales en medios guiados", XXII Symposium Nacional de la URSI, Tenerife, 2007.