

Fabricación aditiva de atenuadores variables de veleta rotatoria en guía de onda

Enrique Márquez-Segura⁽¹⁾, Willian J. Otter⁽²⁾, Stepan Lucyszyn⁽²⁾, Nick Ridler⁽³⁾
ems@ic.uma.es, s.lucyszyn@ic.ac.uk, nick.ridler@npl.co.uk.

⁽¹⁾Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación, Universidad de Málaga,
Bulevar Louis Pasteur 35, 29010, Málaga.

⁽²⁾Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College London,
London SW7 2AZ, U.K.

⁽³⁾Electromagnetic & Electrochemical Department, National Physical Laboratory,
Teddington TW11 0LW, U.K.

Resumen—Rotary Vane Attenuator is considered an industry standard in precision waveguide attenuators. These attenuators exhibit high accuracy, repeatability and reliability. In this paper, the design and fabrication of a rotary vane attenuator using additive manufacturing techniques is presented. The use of several materials to fabricate the lossy septum is discussed. ABS has been used to design all mechanical and waveguide parts. Waveguide parts has been metallised using a dual component spraying technology. Measurements has assessed the validity of the manufacturing process.

I. INTRODUCCIÓN

Los atenuadores de veleta rotatoria (*Rotary vane attenuator*) se han venido utilizando en laboratorios metrológicos de todo el mundo como patrones para la caracterización de atenuadores comerciales en múltiples bandas de frecuencia. Son empleados en la caracterización de diferentes equipos y en gran medida en reflectómetros para analizadores de redes. Este tipo de atenuadores tienen una gran precisión en los valores de atenuación, así como una gran repetibilidad y reproducibilidad [1].

En Fig. 1 se muestra un esquema donde se aprecian cada una de las partes y la configuración de campo en las diferentes interfaces entre las secciones que conforman el atenuador [2]. La operación del atenuador está basada en las funcionalidades específicas de cada una de las tres secciones de guía de ondas circular que han sido representadas. La sección central, que debe poder girar respecto de las otras dos, se encarga realmente de establecer el valor de atenuación mientras que las dos secciones que la flanquean juegan su papel en la configuración del campo que entra y sale respectivamente del dispositivo. Cada una de las secciones tendrá en su plano central una lámina absorbente con baja conductividad que atenuará o eliminará las componentes del campo eléctrico paralelas a la misma. El campo que tenga solo componentes de campo eléctrico verticales se propagará sin ser perturbado por la primera sección, como es el caso del modo fundamental en la guía circular, que es el TE_{11} . Si la sección central no se ha girado el campo se propagará desde el puerto de entrada hasta el puerto de salida sin sufrir atenuación alguna, ya que en ningún momento se inducirán corrientes en las láminas. En el caso de que la sección central se encuentre girada, el campo eléctrico puede descomponerse en dos componentes, una paralela a la lámina y otra perpendicular a ésta. La

componente paralela a la lámina será atenuada y únicamente la componente perpendicular a la lámina alcanzará la salida de la sección transversal. Finalmente, la última sección conformará el campo de forma que únicamente las componentes perpendiculares del campo eléctrico a la lámina puedan alcanzar el puerto de salida, configurándose así de nuevo el modo fundamental de la guía circular. La máxima atenuación se producirá, por tanto, cuando el giro sea de $\theta = 0$ deg respecto de la vertical.

Como se desprende de la observación de Fig. 1, la atenuación del campo en el puerto de salida con respecto al puerto de entrada depende del ángulo relativo de giro de la sección central respecto de las de entrada y de salida. Una característica que es muy importante en este dispositivo es que la atenuación en principio no depende de la frecuencia y, por lo tanto, será constante en toda la banda de diseño. Pero aún más, si el diseño final se realiza con cuidado, la variación de fase para las diferentes atenuaciones puede considerarse despreciable. Estas cualidades le hacen ser, como se ha mencionado anteriormente, el atenuador variable más ampliamente utilizado en los laboratorios de referencia en todo el mundo [3].

En caso de usar el atenuador para diseñar en el entorno de guía rectangular es necesario el uso de una transición de guía rectangular a guía circular. Si bien parecía que la primera sección no tenía un papel en el atenuador, sí que lo tiene en el momento en que se debe diseñar una transición de guía rectangular a guía circular. En este caso la sección se encargará de eliminar resonancias debidas a la aparición de modos diferentes al fundamental en la transición [4].

En Fig. 2 se puede observar el atenuador de veleta rotatoria para WR62. En ella se aprecian las transiciones de guía rectangular a guía circular, así como toda la complicada mecánica con engranajes de precisión asociada al movimiento de la sección central del dispositivo.

En los últimos años, la fabricación aditiva se ha considerado como alternativa a los procesos de fabricación de dispositivos en guía de onda tradicionales [5], [6]. Existen numerosas técnicas de fabricación aditiva que permiten la construcción mediante sinterizado directo de metal por láser. Este tipo de técnicas suelen dar lugar a prototipos con una gran rugosidad que requieren de un tratamiento para eliminarlas o reducir-las mediante deposición de capas exteriores metálicas. Este

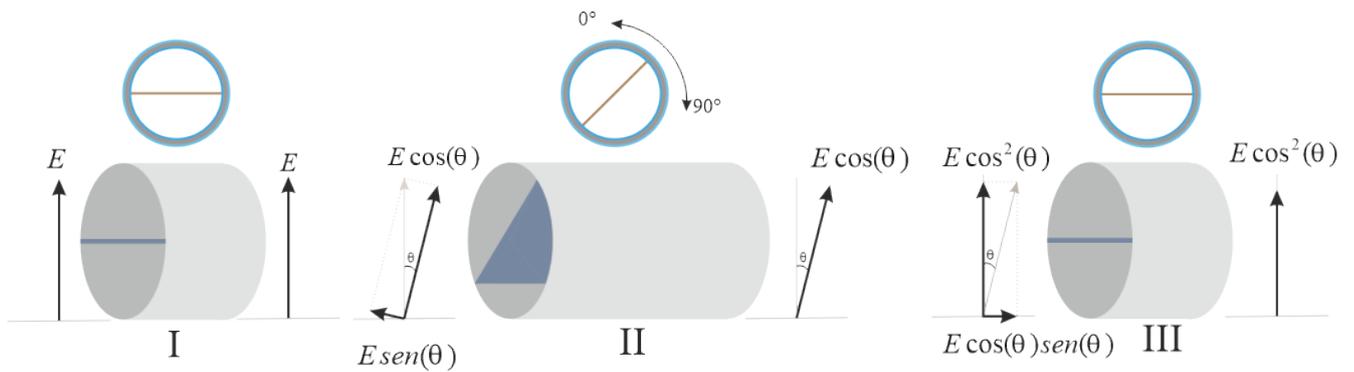


Fig. 1: Descripción del funcionamiento del atenuador de veleta rotatoria



Fig. 2: Atenuador de veleta rotatoria para WR62 disponible en National Physical Laboratory.

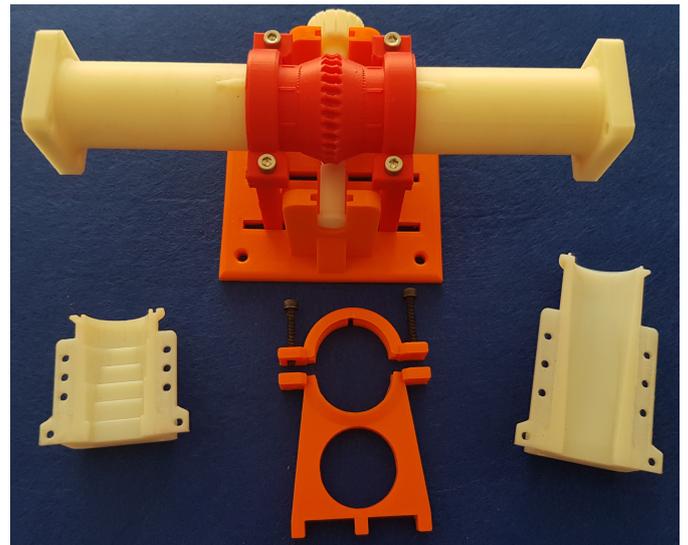


Fig. 3: Imagen del prototipo diseñado previo al proceso de metalización

conjunto de procesos encarece el producto significativamente, siendo razonable su aplicación únicamente en proyectos donde la dificultad de fabricación con técnicas convencionales así lo determine. Como opción diferente se encuentran las tecnologías donde se realiza la fabricación aditiva mediante polímeros o resinas que posteriormente necesitan obligatoriamente el proceso de metalización. En este trabajo se presentan los resultados empleando este segundo tipo de técnicas de fabricación [7], [8].

II. ATENUADOR VARIABLE

En Fig. 3 se muestra el dispositivo diseñado previo al proceso de metalización posterior necesario. Adicionalmente se pueden observar los dos tipos de transiciones en formato abierto y las bridas rígidas que permiten el giro de la estructura intermedia. A continuación, se describirán los aspectos más importantes del diseño de cada una de ellas y de su proceso de fabricación.

A. Transiciones

Como se ha mencionado anteriormente, es necesario para poder establecer el interfaz en guía rectangular una transición a guía circular. La guía rectangular elegida es la WR62. Esta guía tiene unas dimensiones (15.8 mm x 7.9 mm) que son muy adecuadas para las tecnologías de fabricación aditiva

que se van a emplear. De esta forma la rugosidad en las superficies provocado por el proceso de fabricación no es especialmente significativo. Esta rugosidad posteriormente se reduce ligeramente en el proceso de metalización. La guía circular empleada presenta un radio de 10.12 mm que se corresponden con la WC80. La idea es cubrir el rango de funcionamiento monomodo de la guía rectangular. Con estas dimensiones se puede comprobar que en el rango de funcionamiento monomodo de la guía WR62 pueden propagarse varios modos de la guía circular. Estos modos provocarán resonancias en la estructura que serán eliminados mediante la inclusión de láminas absorbentes en las transiciones [9], [10].

Para el atenuador se han diseñado dos tipos de transiciones diferentes. En la Fig. 3 se pueden ver ambas en su versión donde se construyen juntando dos mitades similares. Como se puede apreciar una de ellas se ha diseñado empleando cuatro secciones de un cuarto de longitud de onda cada una y una segunda se ha diseñado mediante un ensanchamiento progresivo que conforma la geometría rectangular en una geometría circular. Ambas cubren la banda con pérdidas de retorno por encima de 20dB en la banda de funcionamiento. Las transiciones se han machihembrados para poder conectarse entre sí empleando las bridas en forma de anillo diseñadas

que igualmente se aprecian en Fig. 3.

B. Fabricación

Una de las características fundamentales de este atenuador variable es que contiene una parte móvil que debe rotar sobre el eje de propagación del campo. Con el fin de llevar a cabo esta funcionalidad mecánica se ha insertado en las secciones centrales engranajes helicoidales que con la interacción de un tornillo sin fin permiten el movimiento suave de la sección. Se debe recordar que este atenuador solo requiere de noventa grados de giro para cubrir todo el rango de atenuaciones que genera. Se han incrustado diferentes marcas de referencia para conocer exactamente el valor del ángulo relativo y, por tanto, el valor de atenuación. Comparando las Fig. 2 donde se muestra un atenuador de referencia y Fig. 3, se puede comprobar la diferencia en complejidad mecánica del prototipo diseñado con respecto al real.

En el proceso de fabricación se han empleado dos tecnologías diferentes para la construcción de los prototipos. Por un lado, la tecnología FDM donde se ha optado por ABS como material debido a sus mejores características estructurales y su menor rugosidad respecto de otros materiales disponibles convencionales. La impresora empleada ha sido una Ultimaker 3 con la que pueden generarse capas de espesores en torno a las 60 micras. En segundo lugar se ha empleado una impresora con tecnología Polyjet de StratasyS que permite generar capas de un material denominado ABS Digital de veinte micras de espesor.

Una vez construidas las estructuras, las guías han de ser metalizadas. Estas se han metalizado empleando la tecnología desarrollada por la empresa JetMetal que permite la deposición de plata mediante aerosol. El resto de elementos no tienen por qué ser metalizados ya que son elementos puramente mecánicos. En Fig. 4 se muestran las secciones centrales ya metalizadas y con las láminas absorbentes introducidas en su parte central. El espesor de la plata depositada es de dos micras que es aproximadamente cuatro veces la profundidad de penetración a la frecuencia más baja de la banda de frecuencias de trabajo.

Las láminas absorbentes de color oscuro que se observan en Fig. 4 son las encargadas de atenuar la componente paralela a ellas del campo eléctrico. Estas láminas han sido construidas empleando la tecnología FDM y dos materiales conductivos de altas pérdidas, en concreto, filamento conductivo con partículas de carbón de la compañía Protopasta y con filamento con escamas de grafeno de la compañía Blackmagic 3D. Este tipo de filamentos debe ser impreso de forma apropiada ya que se trata de filamentos muy abrasivos y deterioran rápidamente las boquillas que permiten el trazado de las capas de material, especialmente si son de latón. El comportamiento de ambos materiales es aproximadamente el mismo siendo la anchura de la lámina de 500 μm . La longitud de la sección central debe ser tal que se complete la eliminación del campo paralelo a la lámina absorbente.

III. RESULTADOS

Inicialmente se verificó el funcionamiento de las transiciones conectadas entre sí. Es importante recordar que estas han sido machihembradas y, por tanto, pueden conectarse entre sí o con las diferentes secciones intermedias. En Fig. 5a se



Fig. 4: Secciones centrales con láminas absorbentes

muestran los resultados obtenidos en esta situación. Se puede apreciar en 5b como en la banda de trabajo la atenuación máxima se produce a la frecuencia mayor y el parámetro de transmisión se encuentra por debajo de -0.65dB . Es importante destacar que las medidas han sido calibradas empleando un conjunto de calibración TRL diseñado específicamente para el experimento y fabricado y metalizado de la misma forma que el resto de elementos en guía. Como se mencionó anteriormente las láminas absorbentes introducidas en las transiciones evitan la aparición de resonancias debido a la presencia de modos de orden superior en la guía circular. Igualmente se puede apreciar como la tecnología Polyjet presenta una respuesta con menor rizado en la banda, debido principalmente a la precisión de las esquinas de los saltos de altura y anchura que conforman la transición.

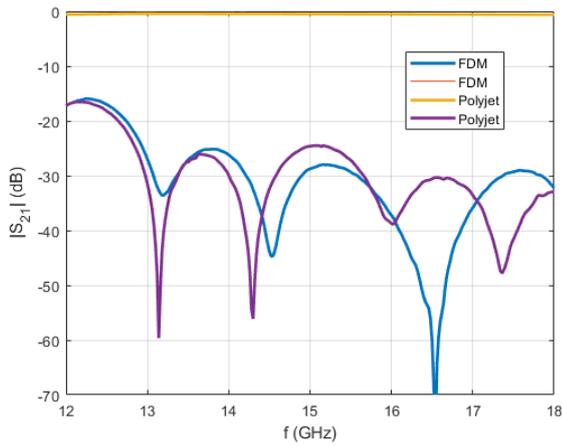
En Fig. 6 se muestra la estructura completa construida y ya metalizada siendo caracterizada. Los resultados en la atenuación medida para diferentes valores de giro se presentan en Fig. 7. A medida que la veleta se aproxima a la vertical del campo la atenuación se incrementa. En el momento que la lámina absorbente es completamente paralela, se alcanza la atenuación máxima. Se puede comprobar como esta atenuación es prácticamente constante en toda la banda de funcionamiento.

IV. CONCLUSIONES

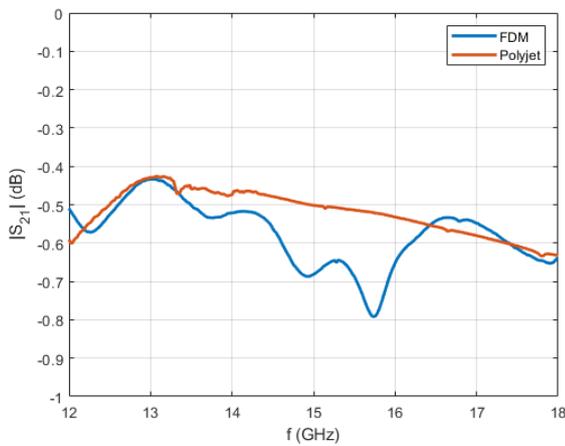
Se ha presentado un atenuador variable mediante veleta rotatoria construido mediante un proceso fabricación aditiva. Se ha demostrado la viabilidad del prototipado rápido y la metalización mediante aerosol de plata de guías de onda con partes móviles. En el diseño y fabricación se han empleado materiales disponibles comercialmente como son filamentos de base PLA con partículas de carbón y con escamas de grafeno. Las excelentes medidas presentadas de las transiciones diseñadas y del atenuador permiten concluir la viabilidad de la tecnología de fabricación aditiva con metalización por aerosol de estructuras en guía de onda.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, mediante el proyecto ADDMATE TEC2016-76070-C3-3-R (AEI/FEDER, UE), y en parte por Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, con la ayuda de movilidad Salvador de Madariaga PRX16/00358.



(a)



(b)

Fig. 5: Transiciones construidas y medidas en configuración espalda contra espalda. (a) Parámetros S. (b) Detalle del parámetro S_{21} .

REFERENCIAS

- [1] T. Y. Otoshi and C. T. Stelzried, "A precision compact rotary vane attenuator," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 19, pp. 843–854, Nov 1971.
- [2] W. Larson, "Analysis of rotation errors of a waveguide rotary-vane attenuator," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 12, pp. 50–55, Sept 1963.
- [3] T. Guldbrandsen, "Precision model for microwave rotary vane attenuator," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 28, pp. 59–66, March 1979.
- [4] M. A. Morgan and S. K. Pan, "Graphical prediction of trapped mode resonances in sub-mm and thz waveguide networks," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 3, pp. 72–80, Jan 2013.
- [5] W. J. Otter, N. M. Ridler, H. Yasukochi, K. Soeda, K. Konishi, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami, and S. Lucyszyn, "3d printed 1.1 thz waveguides," *Electronics Letters*, vol. 53, no. 7, pp. 471–473, 2017.
- [6] W. J. Otter and S. Lucyszyn, "Hybrid 3-d-printing technology for tunable thz applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, pp. 756–767, April 2017.
- [7] B. T. W. Gillatt, M. D'Auria, W. J. Otter, N. M. Ridler, and S. Lucyszyn, "3-d printed variable phase shifter," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, pp. 822–824, Oct 2016.
- [8] M. D'Auria, W. J. Otter, J. Hazell, B. T. W. Gillatt, C. Long-Collins, N. M. Ridler, and S. Lucyszyn, "3-d printed metal-pipe rectangular waveguides," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 5, pp. 1339–1349, Sept 2015.
- [9] T. Larsen, "Superelliptic broadband transition between rectangular and circular waveguides," in *1969 1st European Microwave Conference*, pp. 277–280, Sept 1969.



Fig. 6: Configuración del banco de medida.

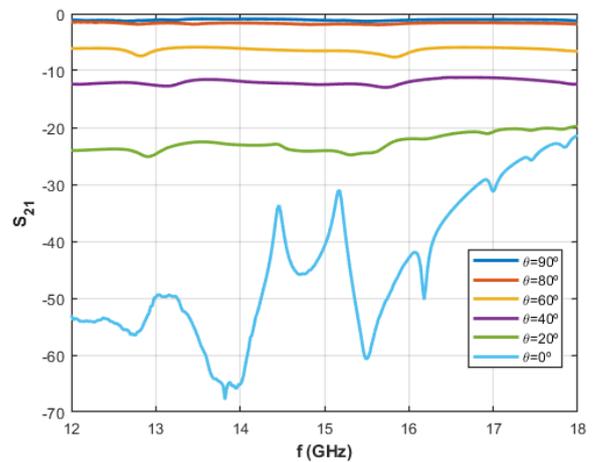


Fig. 7: Medidas en transmisión del atenuador con θ variando de 0° a 90° la veleta rotatoria

- [10] S. Stuchly and A. Kraszewski, "Wide-band rectangular to circular waveguide mode and impedance transformer (correspondence)," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 13, pp. 379–380, May 1965.