



HAL
open science

Fabrication additive monolithique d'un filtre à cavités bi-modes à base de résonateurs ellipsoïdaux

Bastien Peres, Pierre Lemaitre-Auger, Fabien Schwartz, Tan Phu Vuong

► To cite this version:

Bastien Peres, Pierre Lemaitre-Auger, Fabien Schwartz, Tan Phu Vuong. Fabrication additive monolithique d'un filtre à cavités bi-modes à base de résonateurs ellipsoïdaux. XXIIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes Juan-Les-Pins, France. hal-04888509

HAL Id: hal-04888509

<https://hal.science/hal-04888509v1>

Submitted on 15 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Fabrication additive monolithique d'un filtre à cavités bi-modes à base de résonateurs ellipsoïdaux

Bastien Peres¹, Pierre Lemaitre-Auger², Fabien Schwartz³, Tan Phu Vuong¹

¹ Université Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, Grenoble INP, IMEP-LaHC, Grenoble, France

² Université Grenoble Alpes, Grenoble INP, LCIS, Valence, France

³ AML Microtechnique Lorraine, Metz, France
bastien.peres@grenoble-inp.fr

Résumé – Ce papier présente un filtre à cavités ellipsoïdales d'ordre 4 en bande K, conçu pour la fabrication additive métal appelée Selective Laser Melting. Deux conceptions de filtres ont été proposées en suivant une topologie de couplage replié. Le premier filtre à base de cavités cylindriques sert de filtre de référence. L'utilisation de cavités ellipsoïdales sur le 2^{ème} filtre permet de réduire fortement le volume occupé en impactant très peu le facteur de qualité Q_u de la cavité résonante. L'iris de couplage de forme ellipsoïdale permet d'obtenir un filtre avec un facteur de qualité Q_u équivalent au filtre à cavités cylindriques simulé. Les résultats de simulation présentent des pertes par réflexion inférieures à -22 dB avec une bande passante relative d'environ 1%.

1. Introduction

Les filtres à cavités résonantes à base de guides d'onde métallique forment l'une des technologies utilisées pour réaliser un filtrage en fréquence. Leur utilisation est privilégiée au sein des télécommunications satellites grâce à leurs avantages comparé aux autres technologies. Leurs faibles pertes d'insertion et la capacité à supporter des niveaux de puissance élevé sont primordiales dans les cas où le signal d'entrée est très faible ou que le filtre est situé en sortie d'un amplificateur de puissance.

L'inconvénient de cette technologie est que le filtre fabriqué est relativement volumineux et lourd. Les technologies de fabrication additive (FA) apportent quelques avantages permettant de réduire le volume et la masse du filtre. L'étude en [1] détaille le fonctionnement de différentes technologies de FA. Dans la fabrication d'un composant microondes, les technologies peuvent être séparé en 2 catégories. La première catégorie englobe toute fabrication utilisant des matériaux non métalliques comme les technologies d'extrusion de matière ou la Stéréolithographie (SLA) et toute pièce fabriquée devra être métallisée dans un deuxième temps. La seconde catégorie comprend toute fabrication utilisant des matériaux métalliques.

Le procédé de SLA utilise une résine photo sensible pour réaliser des pièces en 3D, permettant d'obtenir des pièces légères [2]. La technologie SLA offre une rugosité de surface relativement faible comparée aux autres technologies de fabrication additive, de l'ordre de $10\mu\text{m}$.

L'étape obligatoire de métallisation pour un filtre fabriqué en matière plastique peut permettre d'atténuer la rugosité de surface.

Quant à la seconde catégorie, un matériau métallique permettra de fabriquer un filtre plus solide avec un plus faible coefficient d'expansion thermique, ce qui limitera les déplacements fréquentiels et représente un critère important pour fonctionner au sein d'un satellite. Néanmoins la rugosité de surface peut atteindre plusieurs dizaines de microns suivant l'angle de fabrication et le procédé utilisé comme l'Electron Beam Melting (EBM) ou le Selective Laser Melting (SLM). Un revêtement d'une matière comme le cuivre ou l'argent avec une conductivité électrique autour des 10^7 S/m ou un traitement de surface comme un polissage chimique ont été montré efficace pour diminuer la rugosité de surface et améliorer le facteur de qualité du filtre [3].

De nombreux travaux ont été publiés afin de profiter de la FA pour améliorer le facteur de qualité du filtre et compenser l'impact de la rugosité de surface [4], [5]. Il a aussi été proposé de prendre en compte l'angle de fabrication par rapport au plateau de fabrication dès l'étape de conception afin de permettre une réalisation sans support [6], [7]. Les cavités résonantes et les iris de couplage prennent des formes plus organiques pour faciliter la FA monolithique du filtre. Le passage de formes avec des angles droits à des formes arrondis simplifie aussi le revêtement des surfaces intérieures pour mettre une épaisseur constante de matière.

Dans ce travail le procédé de SLM sur l'alliage de titane TA6V est utilisé pour fabriquer le filtre d'ordre 4 présenté car il offre la plus faible rugosité de surface comparé aux autres procédés de fusion sur lit de poudre. Le filtre a été conçu pour prendre en compte l'angle de fabrication dès la conception pour une fabrication sans support et faciliter le dépoufrage en fin de fabrication SLM en travaillant sur la forme des iris de couplage. Les sections suivantes développent la conception d'un filtre à cavités cylindriques servant de filtre de référence puis la conception du filtre à cavités ellipsoïdales.

2. Conception du filtre

2.a. Cavité cylindrique

Afin d'estimer l'intérêt du filtre présenté dans la section 2.c, un filtre à cavités cylindriques a été conçu

pour servir de référence. Les deux filtres suivent la topologie de couplage illustrée en Figure 1. Le mode transverse électrique TE_{10} est couplé au mode TE vertical par une iris inductive (couplage S-1 et 4-L). Le mode vertical est couplé au mode horizontal par une vis placée à 45 degrés (couplage 1-2 et 3-4) et les couplages intercavités sont réalisés par 2 iris formant une croix (couplage 1-4 et 2-3). Chaque valeur sur la Figure 1 (1,0741 ; 0,9359 ; ...) correspond aux coefficients de la matrice de couplage définie pour obtenir des pertes par retour (RL) de -22 dB et positionner 2 zéros de transmission donnant une réjection supérieure à 40 dB en dehors de la bande passante.

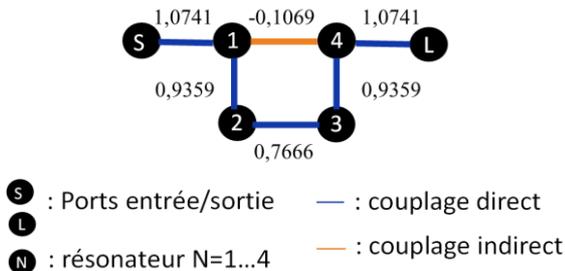


Figure 1. Topologie de couplage repliée à l'ordre 4

Les couplages ont été dimensionnés pour que le filtre à cavités cylindriques illustré en Figure 2 fonctionne à 24 GHz avec une bande passante relative de 1% en suivant la procédure développée en [8]. Chaque plongeur sur la Figure 2 représente les vis de réglage et de couplage.

Les cavités cylindriques dans le filtre réalisé ont un rayon de 5,5 mm et une longueur de 24,5 mm donnant une cavité résonnant à 24,33 GHz d'après l'*eigenmode solver* du logiciel CST Studio Suite. La fréquence de résonance est décalé à 24,33 GHz dû aux longueurs électriques de chaque couplage donnant une cavité résonnante électriquement plus petite.

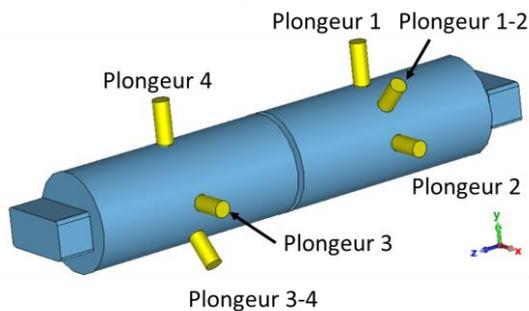


Figure 2. Filtre à cavités cylindriques

2.b. Cavité ellipsoïdale

Contrairement à la cavité cylindrique, la cavité ellipsoïdale illustrée en Figure 3 n'a pas une section transverse uniforme suivant l'axe z. Son dimensionnement a donc été réalisé à l'aide de l'*eigenmode solver*. Le rayon de la cavité ellipsoïdale est fixé à 5,5 mm pour étudier la valeur du facteur de qualité avec le même rayon de la cavité cylindrique. La longueur de la cavité ellipsoïdale est dimensionnée pour que celle-ci résonne à la même fréquence que la cavité cylindrique utilisée dans le filtre de référence, soit 24,33 GHz. Ceci permet de prendre directement en compte les couplages au sein de la cavité car les deux filtres correspondent à la

même matrice de couplage. L'*eigenmode solver* donne une longueur de cavité de 21,55 mm pour un facteur de qualité de 10051 légèrement inférieur au 11826 de la cavité cylindrique. La cavité ellipsoïdale à la Figure 3b a deux maxima d'énergie. Les vis de réglage et de couplage du filtre sont donc positionnées sur ces maxima. Le mode TM_{011} illustré sur la Figure 3c, qui résonne à 22,78 GHz, est également excité car les lignes de champ ont approximativement la même orientation que le mode utilisé à la position des vis de couplage et de réglage.

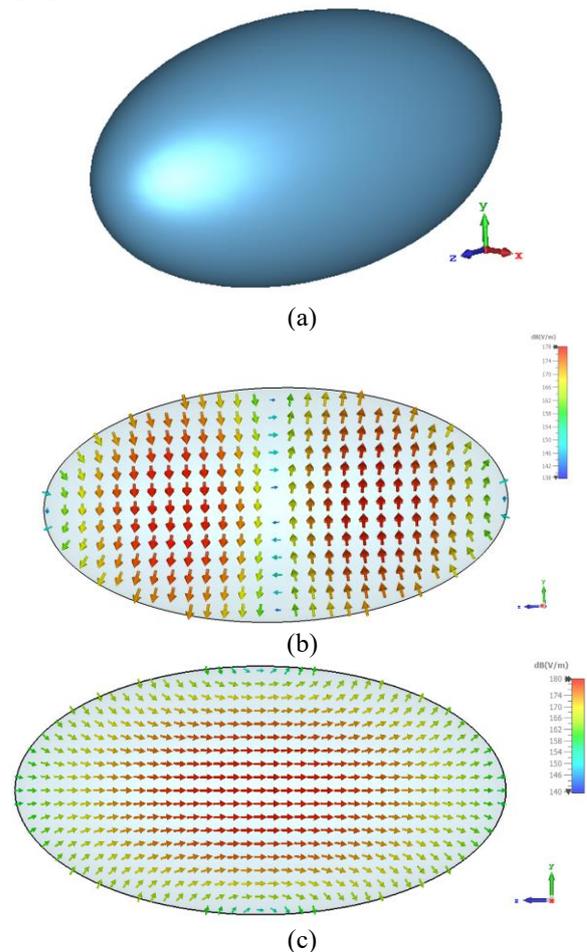


Figure 3. Cavité ellipsoïdale – (a) Structure – (b) Mode TE utilisé – (c) Mode TM_{011}

2.c. Filtre à cavités ellipsoïdales

Le filtre conçu pour être fabriqué en une seule pièce est présenté en Figure 4. L'utilisation de la fabrication additive permet à l'enveloppe métallique extérieure de suivre la forme de la cavité intérieure afin de réduire la masse du filtre. Les supports pour les brides sont laissés de chaque côté du filtre pour assurer un maintien symétrique entre les deux ports et des guides qui viendront s'y connecter.

Les guides d'accès sont au standard WR34 et les largeurs d'iris W , w_h et w_v sont toutes les trois fixées à 3,2 mm pour faciliter le dépoufrage du filtre en fin de fabrication. La longueur L_{port} correspond à la longueur minimale de guide nécessaire à la fixation des différentes vis de réglage et de couplage.

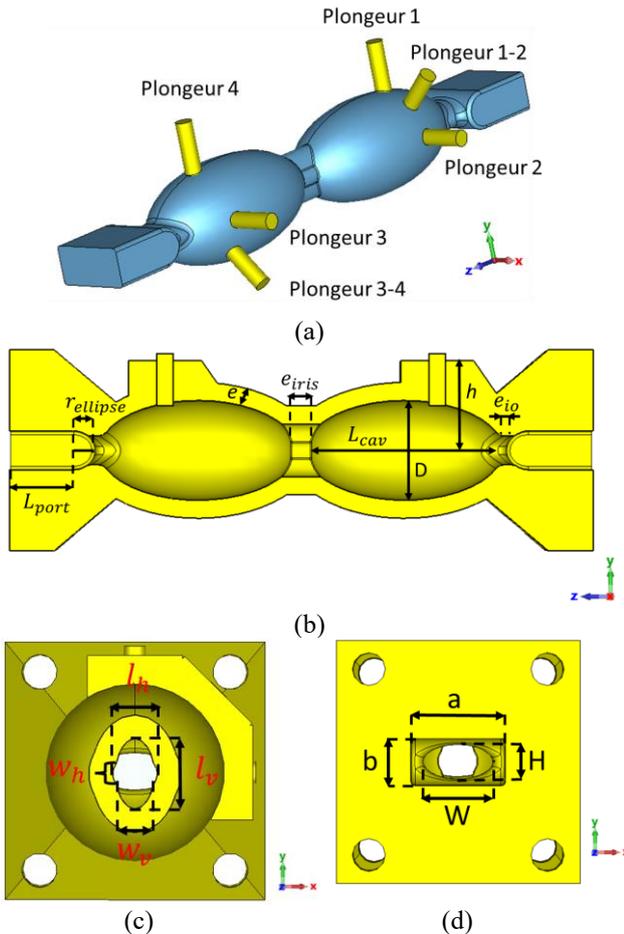


Figure 4. Filtre à cavités ellipsoïdales – (a) Vue d'ensemble avec vis de réglage / couplage – (b) Vue longitudinale– (c) iris ellipsoïdales de couplage inter-cavité – (d) Vue entrée / sortie

Dimensions	Valeurs (mm)
$l_h / w_h / e_{iris}$	3,69 / 3,2 / 1
$l_v / w_v / e_{iris}$	5,83 / 3,2 / 1
$L_{cavité} / D$	21,65 / 11
$W / H / e_{io}$	6,44 / 3,2 / 0,5
$a / b / L_{port} / r_{ellipse}$	8,64 / 4,32 / 7 / 2,4

Tableau 1. Dimensions du filtre à cavités ellipsoïdales conçu

3. Résultats et discussion

Les résultats de simulation de la Figure 5 montrent qu'il est possible d'obtenir des performances équivalentes entre le filtre de référence et le filtre proposé. L'utilisation d'iris elliptiques au lieu d'iris rectangulaires ainsi que l'arrondissement des angles droits à chaque transition entre guide et iris ont permis de rattraper le fait que le facteur de qualité Q_u de la cavité ellipsoïdale était inférieur à celui de la cavité cylindrique. En comparant les facteurs Q_u de chaque filtre avec une conductivité électrique de l'argent à $6,3 \times 10^7$ S/m et une rugosité nulle, on obtient des valeurs très proches : 3495 pour le filtre à cavités ellipsoïdales et 3509 pour le filtre à cavités cylindriques. De plus, un gain en compacité est obtenu car le volume de la cavité

cylindrique est 1,69 fois plus grand que celui de la cavité ellipsoïdale. On observe une amélioration de la réjection hors bande passante du côté des basses fréquences avec le mode TM_{011} excité.

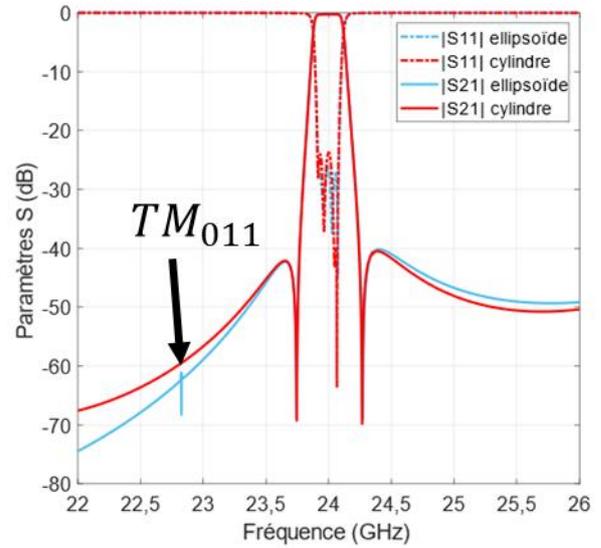


Figure 5. Résultats de simulation : comparaison entre les filtres à cavités cylindriques et ellipsoïdales

Le filtre à cavité ellipsoïdale a été fabriqué en une seule pièce en TA6V. La poudre disponible offrant la plus petite épaisseur de couche de $30 \mu\text{m}$ a été utilisée afin de minimiser la rugosité de surface due à la taille de la poudre. La machine EOS M290 SLM a été utilisée pour la fabrication. Le laser YAG 400W a une taille de faisceau de $81,5 \mu\text{m}$. Le prototype fabriqué est présenté sur la Fig. 6.



Figure 6. Prototype fabriqué en TA6V

Plusieurs relevés dimensionnels ont été réalisés sur le prototype et comparés aux dimensions du modèle 3D. Il est apparu par exemple que les dimensions a et b sur la Figure 4 sont environ $0,15 \text{ mm}$ plus grandes que le modèle 3D, alors que les dimensions externes sont environ $0,15 \text{ mm}$ plus petites que le modèle 3D. Ce décalage est dû en partie au fait que les paramètres machine ont été réglés de manière à obtenir une épaisseur de paroi e inférieure à 2 mm . En ajustant les paramètres de fabrication tels que la distance entre chaque traits de laser ou la trajectoire suivie par le laser, ce décalage peut être minimisé.

Un processus de métallisation à l'argent appelé *LiCS coating* (Liquid Chemical Suspension) n'a pas encore été réalisé avec une épaisseur de $0,03 \text{ mm}$, donc toutes les dimensions sont $0,03 \text{ mm}$ plus grandes que le modèle 3D. Les résultats simulés sont obtenus en utilisant

l'argent comme matériau et une rugosité de surface nulle alors que le TA6V a une conductivité électrique plus faible et une rugosité de surface non nulle. En raison des facteurs mentionnés précédemment, la fréquence centrale est décalée de 0,45 GHz vers des fréquences plus basses, comme illustré sur la Figure 7.

Une rétro-simulation a été réalisée sur le prototype SLM comme illustrée sur la Figure 8. Une conductivité électrique de 1785714 S/m pour le titane et une rugosité de surface moyenne de 7 μm sont utilisées, suivant les résultats détaillés dans [3]. Pour retrouver les résultats mesurés, chaque dimension est plus grande que le modèle 3D de +0,12 mm en moyenne, en accord avec la précision de fabrication estimée de $\pm 0,1$ mm. Les dimensions les plus impactées sont la longueur de chaque iris de couplage avec une variation de +0,27 mm pour W ou de +0,29 mm pour l_v .

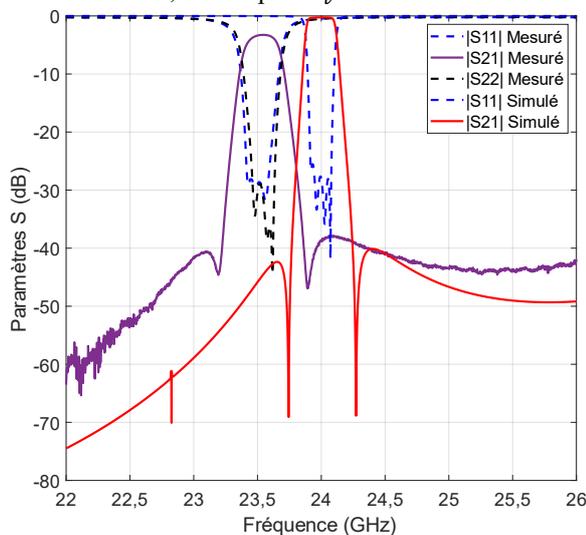


Figure 7. Résultats simulés vs mesurés du prototype fabriqué en TA6V

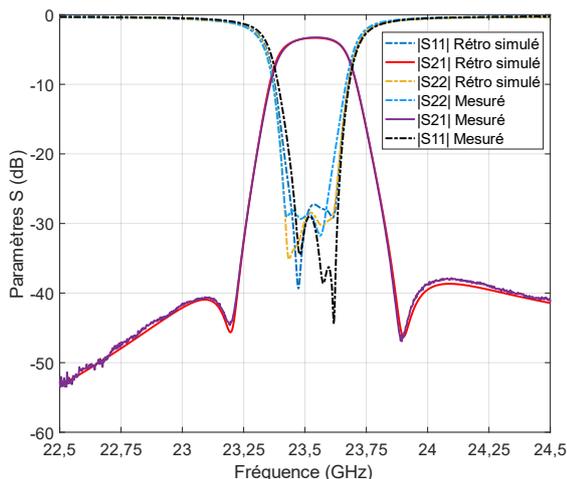


Figure 8. Rétro-simulation vs résultats de mesure du prototype fabriqué en TA6V

La bande passante de 290 MHz obtenue est due aux plus grandes dimensions des iris de couplage. Un RL inférieur à -25 dB a été obtenu avec des pertes d'insertion de -3,26 dB, confirmant l'applicabilité de la technologie SLM dans la bande K. L'asymétrie dans les paramètres de réflexion est due à un réglage réalisé manuellement.

Le processus de revêtement LiCS devrait minimiser l'asymétrie grâce à son effet lissant et à la conductivité électrique de l'argent.

4. Conclusion

Un filtre d'ordre 4 à cavités ellipsoïdales a été présenté en bande K. La prise en compte des contraintes de la fabrication additive métallique comme l'angle de fabrication ou le dépoufrage s'est avérée être utile pour améliorer les pertes d'insertion en optimisant la forme géométrique des différents couplages. Les résultats de mesures ont montré un décalage en fréquence entre la simulation et la mesure, mais un ajustement des paramètres machine pourrait minimiser davantage ce décalage.

Références

- [1] F. Calignano *et al.*, « Overview on Additive Manufacturing Technologies », *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, n° 4, p. 593-612, avr. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2016.2625098.
- [2] C. Guo, X. Shang, J. Li, F. Zhang, M. J. Lancaster, et J. Xu, « A Lightweight 3-D Printed $\text{X}\times\text{X}$ -Band Bandpass Filter Based on Spherical Dual-Mode Resonators », *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 26, n° 8, p. 568-570, août 2016, doi: 10.1109/LMWC.2016.2587838.
- [3] J. A. Lorente, M. M. Mendoza, A. Z. Petersson, L. Pambaguian, A. A. Melcon, et C. Ernst, « Single part microwave filters made from selective laser melting », in *2009 European Microwave Conference (EuMC)*, sept. 2009, p. 1421-1424. doi: 10.23919/EUMC.2009.5296127.
- [4] P. A. Booth et E. Valles Lluch, « Realising advanced waveguide bandpass filters using additive manufacturing », *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, n° 14, p. 1943-1948, nov. 2017, doi: 10.1049/iet-map.2017.0170.
- [5] P. Booth et E. V. Lluch, « Enhancing the Performance of Waveguide Filters Using Additive Manufacturing », *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, n° 4, p. 613-619, avr. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2016.2616494.
- [6] P. Booth, « Additive Manufactured Bandpass Filters at Ka-band », in *2019 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, juill. 2019, p. 7-9. doi: 10.1109/IMWS-AMP.2019.8880131.
- [7] O. A. Peverini *et al.*, « Selective Laser Melting Manufacturing of Microwave Waveguide Devices », *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, n° 4, p. 620-631, avr. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2016.2620148.
- [8] S. Cogollos *et al.*, « A Systematic Design Procedure of Classical Dual-Mode Circular Waveguide Filters Using an Equivalent Distributed Model », *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, n° 4, p. 1006-1017, avr. 2012, doi: 10.1109/TMTT.2012.2183381.