



**HAL**  
open science

## Conception d'une sonde de mesure champ proche de section réduite

Lucille Kuhler, Andrea Giacomini, Nathalie Raveu, Gwenn Le Fur, Luc Duchesne

► **To cite this version:**

Lucille Kuhler, Andrea Giacomini, Nathalie Raveu, Gwenn Le Fur, Luc Duchesne. Conception d'une sonde de mesure champ proche de section réduite. 16èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Nov 2020, Toulouse( virtuel), France. hal-03046488

**HAL Id: hal-03046488**

**<https://enac.hal.science/hal-03046488>**

Submitted on 8 Dec 2020

**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.

## Conception d'une sonde de mesure champ proche de section réduite

L. Kuhler<sup>1,2,3</sup>, A. Giacomini<sup>4</sup>, N. Raveu<sup>1</sup>, G. Le Fur<sup>2</sup> et L. Duchesne<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Université de Toulouse, INPT, UPS, LAPLACE, ENSEEIHT, Toulouse, France  
<sup>2</sup>Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Toulouse, France  
<sup>3</sup>MVG Industries, Villejust, France  
<sup>4</sup>Microwave Vision Italy, Pomezia, Italie  
 kuhler.lucille@gmail.com

**Résumé** — Les dimensions des sondes sont des paramètres critiques lorsqu'elles sont utilisées en mesure champ proche des antennes. En effet, les propriétés radioélectriques de la sonde ne doivent pas impacter les mesures de l'antenne. Dans cet article, la Théorie Modale Élargie est utilisée pour concevoir un guide d'onde ouvert à section réduite à métamatériaux.

### I. INTRODUCTION

Les sondes de mesure généralement utilisées pour les mesures en champ proche sont de type guide d'onde ouvert (OEW) [1]. Les OEW rectangulaires sont bien connus pour leur dimension physique réduite et leur pureté de polarisation [1]. Cependant, ce type de section ne permet pas de réaliser des mesures en polarisation duale. Pour palier cela, les OEW à section cylindrique peuvent être utilisés, mais la taille de ces ouvertures peut être importantes et ainsi, impacter les mesures des antennes sous test (AUT).

Afin de réduire les interactions entre l'AUT et la sonde de mesure et ainsi de réduire leur impact sur les mesures de l'AUT, la taille des sondes et notamment leur ouverture doit être la plus petite possible. Grâce aux propriétés atypiques des métamatériaux [2]–[4], il est alors possible de les insérer au niveau des parois des guides pour réduire leur section [5]–[7]. La Théorie Modale Élargie (TME) peut alors être utilisée pour trouver rapidement les dimensions du métamatériau permettant cette réduction [7]–[12].

### II. METHODOLOGIE POUR REDUIRE LA SECTION ET CHOIX DU METAMATERIAU

La TME permet de caractériser les guides d'onde à métamatériaux grâce à un calcul analytique où le métamatériau est remplacé par un couple d'impédances de surface équivalentes [7]–[12], comme représenté sur la figure 1. Ces impédances ( $Z'_T, Z'_Z$ ) sont alors dépendantes de la fréquence et de l'angle d'incidence  $\phi$  de l'onde qui se propage et s'écrivent selon (1) [7]–[12].

$$Z'_T = -\frac{E_\theta}{H_z}\Big|_{\Omega'}, \quad Z'_Z = \frac{E_z}{H_\theta}\Big|_{\Omega'} \quad (1)$$

Dans le cas des guides d'onde cylindriques, la TME a été développée pour caractériser les guides d'onde à

métamatériaux invariants en  $\theta$ , dits 2-D [10]–[12]. Dans cet article, la TME est étendue à des guides présentant des métamatériaux variant en  $\theta$ , dits 3-D. Une nouvelle méthodologie basée sur la TME est présentée dans la section II.A. Elle est utilisée pour concevoir une sonde de mesure à section réduite.

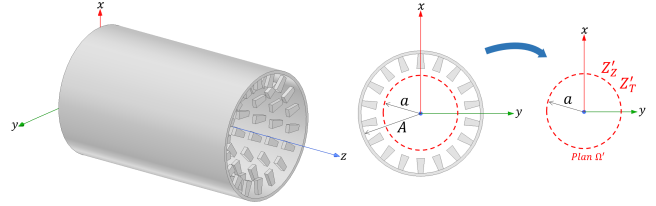


Fig. 1. Guide d'onde cylindrique à métamatériaux caractérisés par impédances de surface équivalente.

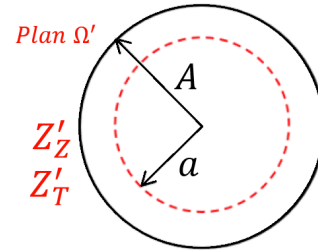


Fig. 2. Guide d'onde cylindrique de rayon  $a$  à paroi anisotrope ( $Z'_T, Z'_Z$ ).

#### A. Méthodologie pour réduire la section

On considère un OEW cylindrique ayant une fréquence de coupure de 6 GHz, son rayon  $A_0$  est donc de 14,65 mm et son mode fondamental est le  $TE_{11}$ . Dans cet article, un nouvel OEW de section de rayon  $A$  inférieur à  $A_0$  ayant un mode fondamental semblable au  $TE_{11}$  et une fréquence de coupure proche de 6 GHz est conçu grâce à la nouvelle méthodologie proposée. Cette méthodologie se base sur la TME.

La TME est tout d'abord appliquée à des guides d'onde cylindriques à paroi anisotrope idéale (avec des impédances de surface constantes dans la bande de fréquence d'intérêt), de rayon  $a = 5$  mm, comme présenté sur la figure 2, sachant que le choix de ce rayon n'a pas d'importance dans l'algorithme de la TME. Différents couples d'impédances de surface ( $Z'_T, Z'_Z$ ) sont appliqués sur la paroi du guide pour créer les guides anisotropes. Les diagrammes de dispersion de ces guides, obtenus avec la TME [9], sont présentés dans le tableau de la figure 3, tracés en bleu dans la bande passante [0; 9] GHz.

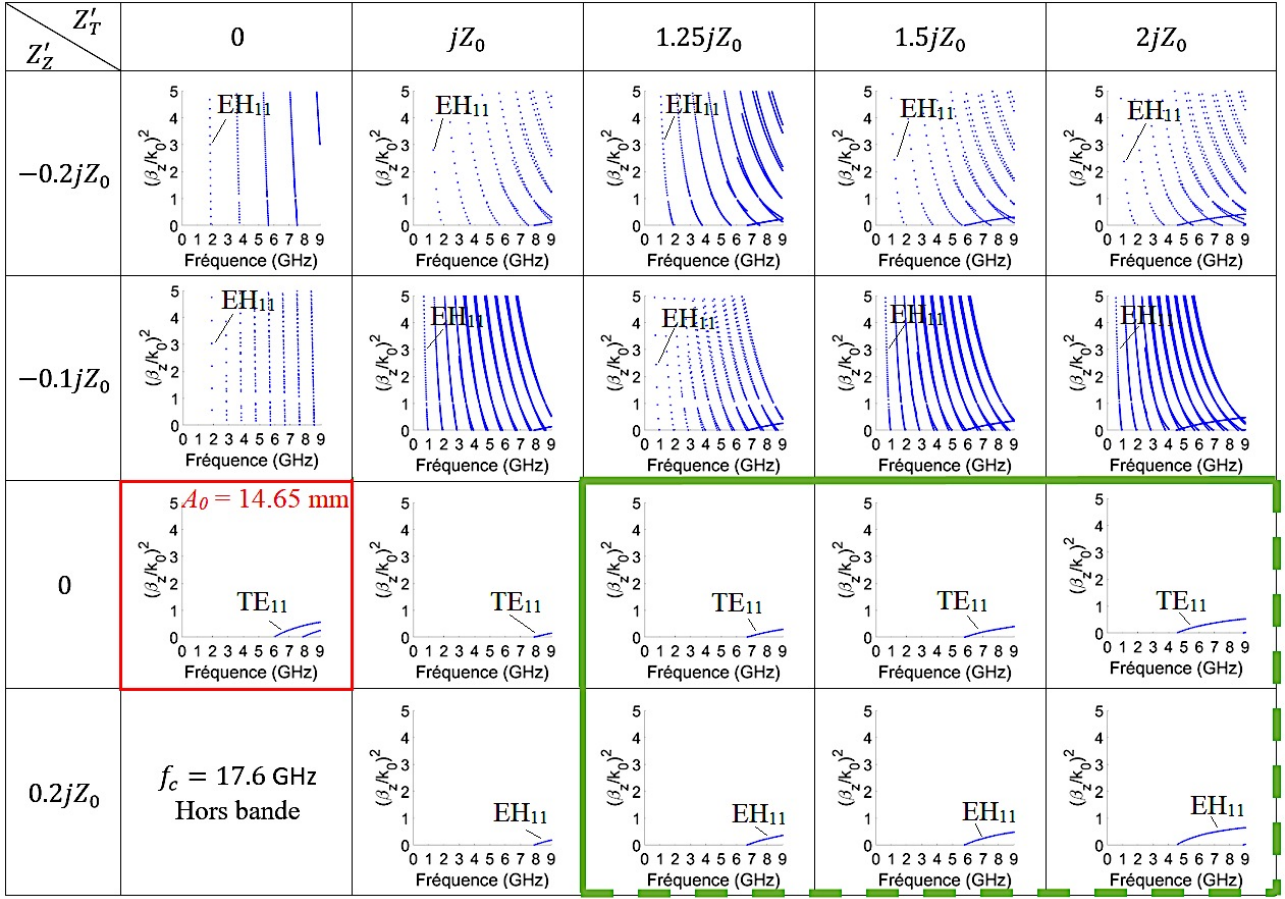


Fig. 3. Diagrammes de dispersion d'un guide d'onde cylindrique de rayon  $a = 5$  mm pour diverses combinaisons d'impédances.

Le couple d'impédances correspondant au cas métallique  $(0, 0) \Omega$ , servant de référence, est encadré en rouge. Grâce à ce tableau, il est possible de sélectionner la gamme d'impédance qui permet d'obtenir un guide d'onde respectant les critères de conception suivant : fréquence de coupure proche de 6 GHz et un mode fondamental  $TE_{11}$  ou  $EH_{11}$ . En effet, ce mode est similaire au mode  $TE_{11}$ , [13]–[15]. Les limites en vert correspondent à la gamme permettant de respecter ces conditions de conception.

Cette gamme définie par la condition d'impédances (2) est alors utilisée pour dimensionner le métamatériau afin de réaliser (2) en a.

$$\begin{cases} Z'_T \geq 1,25jZ_0 \\ Z'_z \geq 0 \Omega. \end{cases} \quad (2)$$

Pour cela, un code basé sur la Méthode des Éléments Finis (FEM) 3-D est utilisé pour tracer les impédances de surface équivalentes du métamatériau. En modifiant manuellement les dimensions du métamatériau, il est possible d'en déterminer un respectant la gamme d'impédances.

Puis la TME implémenté de ce code FEM 3-D est utilisée pour tracer le diagramme de dispersion du guide d'onde ayant ce métamatériau au niveau de la paroi.

### B. Choix du métamatériau

Il existe différent type de métamatériaux 3-D. Un métamatériau de type « pic », comme présenté sur la figure 4, est retenu car il permet respecter le critère d'impédance.

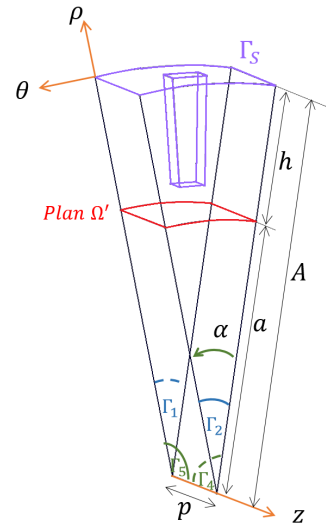


Fig. 4. a) Cellule élémentaire du métamatériau « pic » avec  $A = 12,7$  mm,  $a = 6,2$  mm,  $d = 5,08$  mm,  $e = 0,85$  mm,  $h = 6,5$  mm,  $p = 4,23$  mm et  $\alpha = 45^\circ$ .

Ses dimensions : sa profondeur  $d$  et son épaisseur  $e$  ont été modifiées de façon à respecter la gamme d'impédances (2) en a, comme en atteste la figure 5 sur laquelle la condition d'impédance est représentée par une ligne en tiret vert. Par ailleurs, cette figure prouve la dépendance en

angle d'incidence des impédances, puisqu'elles ont des valeurs différentes pour  $\phi = 45^\circ$  et  $\phi = 90^\circ$ .

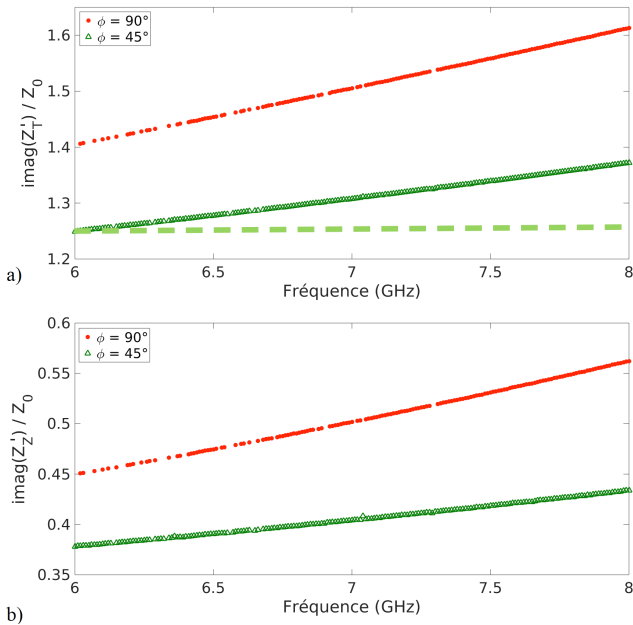


Fig. 5. Les impédances de surface équivalentes ( $Z_T', Z_Z'$ ) normalisées calculées en a.

La TME est alors utilisée pour tracer le diagramme de dispersion complet de ce guide d'onde à « pic ». Il est comparé au diagramme de dispersion du guide d'onde métallique de rayon  $A_0$  sur la figure 6. Dans la bande de fréquences, deux modes se propagent dans chaque guide. Les modes sont identifiés automatiquement à l'aide de la TME [7]–[12]. Les deux premiers modes des guides à « pic » et métallique sont respectivement les modes hybrides  $EH_{11}$  et  $EH_{21}$  et les modes  $TE_{11}$  et  $TM_{01}$ . La condition sur le mode fondamental proche de  $TE_{11}$  est alors respecté, [13]–[15]. La bande monomode du nouveau guide est [6,1; 8,65] GHz, elle a donc été augmentée par rapport à la bande monomode du guide métallique qui est de [6; 7,84] GHz. Le critère sur la fréquence de coupure est lui-aussi respecté. Il est important de noter qu'en ajoutant le « pic » il a été possible de réduire la section du guide de 24,8%, puisque  $A$  vaut 12,7 mm et  $A_0$  14,65 mm, tout en conservant une fréquence de coupure proche de 6 GHz.

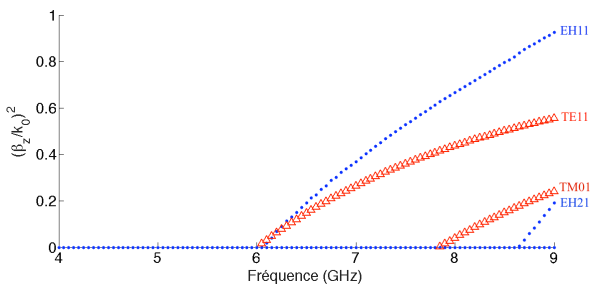


Fig. 6. Diagramme de dispersion de la sonde à « pic » en point bleu et de la sonde métallique en triangle rouge.

### III. CARATERISATION DE LA SONDE DE MESURES

Comme le métamatériau respecte la gamme d'impédances et que le guide à « pic » respecte le cahier

des charges (en bande passante, en mode fondamental et en taille), la sonde de mesure à « pic » a été fabriquée par impression 3-D [16], elle est représentée sur la figure 7a). Les différentes caractéristiques de la sonde sont mesurées et présentées ci-dessous.

#### A. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion de la sonde est mesuré dans une chambre anéchoïque à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel Anritsu MS4647B, représenté sur la figure 7b). Le niveau est inférieur à  $-7$  dB à partir de 6,55 GHz.

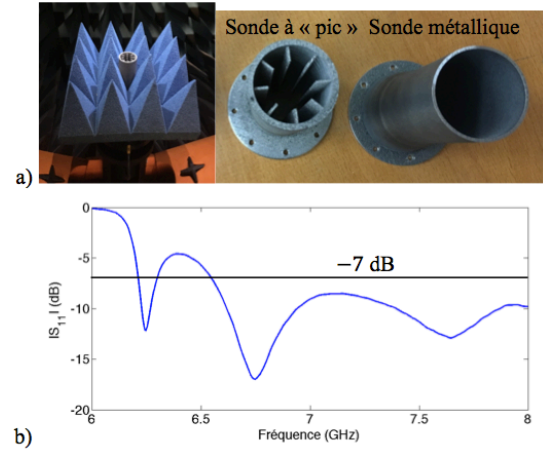


Fig. 7. a) Sondes à « pic » (dans la StarLab 18 GHz de MVG [17] sur la photo de droite) et métallique, b) et le coefficient de réflexion de la sonde à « pic ».

#### B. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement de la sonde est maintenant mesuré à l'aide de la StarLab 18 GHz de MVG [17] à 6,75 GHz (creux du  $S_{11}$ ). Il est représenté sur la figure 8. La directivité maximale est de 6,95 dBi, ce qui est tout à fait comparable avec la sonde cylindrique métallique (7,47 dBi) malgré une réduction de section de 24,8%. La discrimination de polarisation est de 22,95 dB.

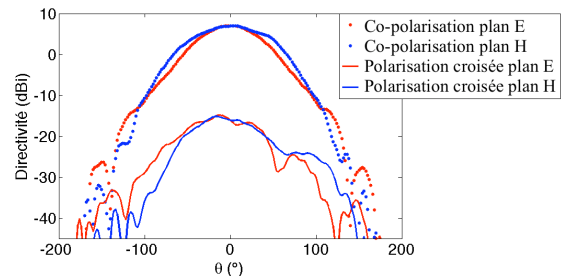


Fig. 8. Diagramme de rayonnement de la sonde à « pic » mesuré à 6,75 GHz.

#### C. Interférences

Pour mesurer les interférences causées par la présence de la sonde dans une mesure d'une AUT en champ proche, la procédure de [1], [18] est mise en place. Dans un premier temps, on mesure le coefficient de réflexion d'une antenne cornet de référence en espace libre, voir figure 9 en rouge. Ensuite on place la sonde métallique puis la sonde à « pic » chargées sur  $50 \Omega$  face à cette antenne à une distance de  $3\lambda$

(à 6 GHz,  $3\lambda = 15$  cm, distance cohérente pour une mesure en champ proche). Le coefficient de réflexion de l'antenne cornet est à nouveau évalué, voir figure 9 en vert et bleu. En calculant, le ratio de ces coefficients de réflexion, voir figure 10, il est possible d'obtenir le niveau d'interférences induit par la présence des sondes avec (3) [18]–[21].

$$IL(\text{dB}) = 20 \log \left| 10^{\frac{D_{VSWR}}{40}} - 1 \right|, \quad (3)$$

où  $D_{VSWR}$  est le niveau maximum crête-à-crête de la différence des VSWR de la figure 10.

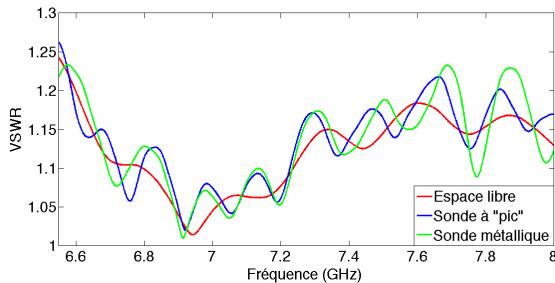


Fig. 9. Mesure du coefficient de réflexion des sondes.

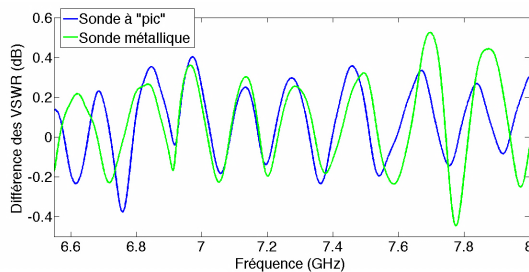


Fig. 10. Ratio des coefficients de réflexion (dB) des sondes.

Ainsi, on trouve un niveau d'interférence [1], [18] de  $-26.7$  dB pour la sonde à « pic » et de  $-24.6$  dB pour la sonde métallique. La réduction de la section de la sonde permet donc de limiter les interférences dans le cadre des mesures en champ proche.

#### IV. CONCLUSION

Dans cet article, la Théorie Modale Élargie (TME) a été appliquée pour la conception d'une sonde de mesure pour champ proche à section réduite. La nouvelle sonde a été fabriquée, ainsi que la sonde métallique de référence. Différentes mesures ont été faites pour valider le fonctionnement de la sonde à « pic ». Les performances des deux sondes sont alors similaires, bien que la sonde à « pic » possède une section réduite de 24,8% par rapport à la sonde métallique. Dans la dernière partie, il a été prouvé que la sonde à matériaux engendre moins d'interférences que la sonde métallique sur des mesures en champ proche. Pour valider parfaitement le fonctionnement de la sonde à « pic » il serait intéressant de l'utiliser pour qualifier une antenne de référence.

#### REFERENCES

- [1] A. Giacomini, V. Schirosi, R. Morbidini, L. J. Foged, J. Estrada, J. Acree, L. M. Tancioni, "Dual-Polarized Probe with Full Octave Bandwidth and Minimum Scattering for Planar Near Field Measurements," in Proc. *Antenna Measurement Techn. Association Symp. (AMTA)*, Atlanta, 15-20 Oct. 2017..
- [2] V. G. Veselago, "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," *Sov. Phys. Usp.*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, 1968.
- [3] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 18, pp. 4184-4187, May 2000.
- [4] R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction," *Science*, vol. 292, no. 5514, pp. 77-79, Apr. 2001.
- [5] J. G. Pollock and A. K. Iyer, "Below-Cutoff Propagation in Metamaterial-Lined Circular Waveguides," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 61, no. 9, pp. 3169-3178, Sep. 2013.
- [6] J. G. Pollock and A. K. Iyer, "Experimental Verification of Below-Cutoff Propagation in Miniaturized Circular Waveguides Using Anisotropic ENNZ Metamaterial Liners," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 64, no. 4, pp. 1297-1305, Apr. 2016.
- [7] B. Byrne, "Etude et Conception de Guides d'Onde et d'Antennes Cornets à Métamatériaux," These de doctorat d'état, Univ. Toulouse, Toulouse, France, 2016.
- [8] B. Byrne, N. Raveu, N. Capet, G. Le Fur and L. Duchesne, "Modal analysis of Rectangular Waveguides with 2D Metamaterials," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 70, pp. 165-173, 2016, doi: 10.2528/PIERC16092904.
- [9] N. Raveu, B. Byrne, L. Claudepierre and N. Capet, "Modal Theory for Waveguides with Anisotropic Surface Impedance Boundaries," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 64, no. 4 pp. 1153-1162, Apr. 2016.
- [10] L. Kuhler, G. Le Fur, L. Duchesne, N. Raveu "The Propagation Characteristics of 2-D Metamaterial Waveguides Using the Modal Expansion Theory," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 66, no. 10, pp. 4319-4326, Oct. 2018.
- [11] L. Kuhler, G. Le Fur, L. Duchesne, N. Raveu, "Modal Analysis of Cylindrical Waveguides with 2-D Metamaterial Wall," in Proc. *META 2018 - The 9th Int. Conf. Metamaterials, Photonic Crystals Plasmonics*, Marseille, France, 2018.
- [12] L. Kuhler, N. Raveu, G. Le Fur, L. Duchesne, "Théorie Modale Élargie Appliquée aux Guides d'Onde Cylindriques à Métamatériaux," in Proc. *XXIème Journées Nationales Microondes*, Caen, France, 2019.
- [13] B. MacA. Thomas, H.C. Minnett, "A Method of Synthesizing Radiation Patterns with Axial Symmetry," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-14, no. 5, pp. 654-656, Sep. 1966.
- [14] E. Lier, "Review of Soft and Hard Horn Antennas, Including Metamaterial-Based Hybrid-Mode Horns," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 31-39, Apr. 2010.
- [15] P. J. B. Clarricoats, "Analysis of Spherical Hybrid Modes in a Corrugated Conical Horn," *Electron. Lett.*, vol. 5, no. 9, pp. 189-190, May 1969.
- [16] L. J. Foged, A. Giacomini, R. Morbidini, F. Saccardi, V. Schirosi, M. Boumans, B. Gerg Jr., D. Melachrinou, "Investigation of Additive Manufacturing for Broadband Choked Horns at X/Ku Band," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 17, no. 11, pp. 2003-2007, 2018.
- [17] [https://www.mvg-world.com/en/system/files/starlab\\_2014.pdf](https://www.mvg-world.com/en/system/files/starlab_2014.pdf).
- [18] IEEE, "149-1979 - IEEE Standard Test Procedures for Antennas," ISBN 0-7381-0556-2, 1979.
- [19] A. C. Newell, "Error Analysis Techniques for Planar Near-Field Measurements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 36, no. 6, pp. 754-768, Jun. 1988.
- [20] A. C. Newell, R. D. Ward and E. J. McFarlane, "Gain and Power Parameter Using Planar Near-Field Techniques," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 36, no. 6, pp. 792-803, Jun. 1988.
- [21] A. G. Rejzgar, A. C. Newell, M. H. Francis, "Accurate Determination of Planar Near-Field Correction Parameters for Linearly Polarized Probes," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 36, no. 6, pp. 855-868, Jun. 1988.