



HAL
open science

Analyse et Modélisation d'une Structure 3D Sélective en Fréquence Combinant un Tronçon de Guide et un Résonateur Plié

P Le Bihan, M. García-Vigueras, Erwan Fourn, R. Gillard, Isabelle Le Roy
Naneix, Stefan Varault, Christian Renard

► **To cite this version:**

P Le Bihan, M. García-Vigueras, Erwan Fourn, R. Gillard, Isabelle Le Roy Naneix, et al.. Analyse et Modélisation d'une Structure 3D Sélective en Fréquence Combinant un Tronçon de Guide et un Résonateur Plié. 21èmes Journées Nationales Micro-ondes, May 2019, Caen, France. hal-02307105

HAL Id: hal-02307105

<https://hal.science/hal-02307105>

Submitted on 7 Oct 2019

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.

Analyse et Modélisation d'une Structure 3D Sélective en Fréquence Combinant un Tronçon de Guide et un Résonateur Plié

P. Le Bihan¹, M. Garcia-Vigueras¹, E. Fourn¹, R. Gillard¹
Isabelle Le Roy Naneix², Stefan Varault², Christian Renard²

¹ Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes,

² THALES Defense Missions Systems
paul.le-bihan@insa-rennes.fr

Résumé – Cet article présente l'analyse et la modélisation d'une structure sélective en fréquence en trois dimensions (FSS-3D). La cellule dite du Guide à Résonateur filaire Intégré (GRI) est identifiée comme structure prometteuse pour des applications de filtrage large-bande. Son analyse sous incidence normale est menée, aboutissant à l'élaboration d'un circuit équivalent, reproduisant avec une bonne précision le comportement de cette structure GRI.

1. Introduction

Une surface sélective en fréquence, communément appelée FSS (*Frequency Selective Surface*), est un assemblage périodique infini de motifs en une ou deux dimensions. Lorsqu'une onde incidente vient la frapper, une portion de l'énergie est transmise au travers, tandis que l'autre est réfléchie. Une opération de filtrage est ainsi réalisée, dont la réponse en fréquence, polarisation et incidence dépend de la géométrie du motif élémentaire et des matériaux qui la composent.

Historiquement constituées d'éléments conducteurs imprimés sur substrat diélectrique [1], les FSS trouvent principalement leur application dans les radômes, les réflecteurs ou encore les absorbants. De nos jours, les performances exigées sont de plus en plus élevées. Large bande, fortes réjections, comportement bi-polarisation et tenue en incidence constituent des critères majeurs.

Les nouvelles méthodes de fabrication par impression 3D, ou *additive manufacturing*, rendent possible la fabrication de structures de plus en plus complexes. Ainsi, voit-on apparaître dans la littérature de nouveaux types de structures sélectives en fréquence, réalisées à partir d'éléments non plus planaires, mais exploitant pleinement les trois dimensions de l'espace. Ces structures, dites FSS-3D, ouvrent de nouvelles pistes pour atteindre des performances toujours plus élevées. Le Guide à Résonateur filaire Intégré (GRI) [2-4] présente des caractéristiques de filtrage particulièrement intéressantes, dont une large bande passante et de bons niveaux de réjection. La contribution proposée dans cet article présente une approche permettant de modéliser le comportement de cette structure sous incidence normale.

Cet article est organisé comme suit : après un bref état de l'art des FSS-3D partie 2, l'étude du GRI, aboutissant à l'élaboration d'un circuit électrique équivalent, est

présentée partie 3. Enfin, une dernière partie présente le développement de ce circuit étape par étape, ainsi que les résultats de simulation permettant la validation de ce modèle.

2. Etat de l'art des FSS-3D

Les structures sélectives en fréquence en trois dimensions ont fait leur apparition dans la littérature il y a environ une dizaine d'années. À ce jour, de nombreux travaux scientifiques ont été produits dans ce domaine, présentant une grande variété de FSS-3D.

Une approche assez intuitive, introduite par Parker *et al* dans [5] s'appuie sur des motifs planaires connus tels que le dipôle ou ladite *four-legged loop*. En repliant sur eux-mêmes les conducteurs de ces éléments, il est possible de réduire leur périodicité tout en conservant leur longueur électrique. Cette réduction de la taille de la cellule unitaire permet de diminuer l'impact de l'incidence oblique sur la réponse en fréquence obtenue. Par ailleurs, une périodicité réduite de la structure repousse à des fréquences plus élevées l'arrivée des harmoniques d'espace, ou harmoniques de Floquet, très problématiques dans la maîtrise de cette réponse sur une large bande spectrale. Malgré ces avantages, de telles structures repliées offrent des propriétés de filtrage d'ordre et de largeur de bande restreints.

Dès 2010, Rashid et Shen proposent un nouveau type de FSS-3D [6]. La cellule unitaire présentée est composée d'une ligne microruban sur substrat muni d'un plan de masse, disposée selon l'axe de propagation pour une incidence normale. La structure périodique est ainsi constituée d'un empilement de lattes, séparées par une portion d'espace libre. Pour permettre à l'onde incidente de traverser cette structure, deux chemins se distinguent. Un premier via le mode supporté par la ligne microruban, et un second, dans l'espace libre laissé entre les lattes de substrat qui composent la structure. La propagation simultanée de l'onde incidente à travers ces deux chemins génère, à des fréquences particulières, des pôles et zéros de transmission. Une réponse coupe bande sélective d'une largeur de l'ordre de 60% est obtenue. De nombreux travaux s'appuyant sur ce principe ont d'ores et déjà été publiés, présentant notamment des structures en bi-polarisation, caractéristique obtenue par enchevêtrement

de lattes de substrat verticales et horizontales, comme dans [7]. Ces structures dites à lignes empilées ont également fait l'objet d'un travail de modélisation par circuit électrique équivalent. La prise en compte des différents chemins de propagation est représentée par des lignes de transmission placées en parallèle, mettant en évidence le mécanisme de fonctionnement de ce type de structures.

La propagation de différents modes au sein d'une cellule unitaire a également été exploitée dans des structures de différents types différents, notamment dans [8]. Ici, la cellule est composée de multiples guides d'onde carrés, placés dans une configuration coaxiale. L'interaction des modes de propagation supportés donne lieu à une transmission ou une réflexion totale de l'onde incidente. La cellule, de géométrie simple et compacte, permet d'obtenir une bande passante d'environ 13% et une tenue de la réponse en incidence de ± 40 degrés. Par ailleurs, symétrique par nature, cette structure assure un fonctionnement bi-polarisation. Là encore, la modélisation par tronçons de lignes de transmission représentant les différents chemins de propagation possibles permet de reproduire avec précision la réponse en fréquence obtenue. L'utilisation de guides d'ondes comme base de cellule unitaire a par ailleurs été exploitée lors d'études différentes. Dans [9] les phénomènes de fréquence de coupure et de résonance de Fabry-Pérot constituent des propriétés intéressantes pour obtenir une réponse large bande. L'intégration d'éléments résonants permet d'enrichir la réponse en fréquence de ce type de guides, comme dans [10], où les parois d'un guide carré sont munies de sillons gravés en H. La circulation des courants sur le contour des fentes génère une résonance. Des travaux analogues ont été présentés dans [11], où le résonateur est réalisé à l'aide d'éléments interdigités, toujours supportés par les parois d'un guide carré.

Ce tour d'horizon de la littérature rend bien compte de la grande diversité qu'offrent les FSS-3D en termes de géométries réalisables et de conception de filtres spatiaux plus ou moins large bande. Il est par ailleurs intéressant de noter que dans le cas des structures à base de lignes microruban empilées comme de celles à base de guide d'onde, le travail de modélisation débouche sur des circuits électriques équivalents de topologie similaire, malgré des géométries relativement différentes. La propagation simultanée de différents modes y est représentée par des lignes de transmission placées en parallèle. Ce principe sera repris dans cet article.

3. Modélisation de la cellule GRI

Parmi les FSS-3D à base de guide d'onde, la cellule GRI [2-4] se démarque nettement par ses performances, en atteignant 67% de bande passante, une forte sélectivité et une forte réjection. Les travaux publiés dans [2-4] portent sur la structure présentée Figure 1 (a). Cette cellule est composée d'un guide d'onde carré, dans lequel est inséré un résonateur constitué de quatre brins métalliques, sensible aux polarisations linéaires Verticale (V) ou Horizontale (H). Par souci de simplicité, nous nous intéressons dans notre cas à la structure réduite illustrée Figure 1 (b). Cette cellule simplifiée inclut un résonateur

formé de deux brins métalliques, dont les extrémités sont repliées selon y , et donc sensibles à la polarisation V.

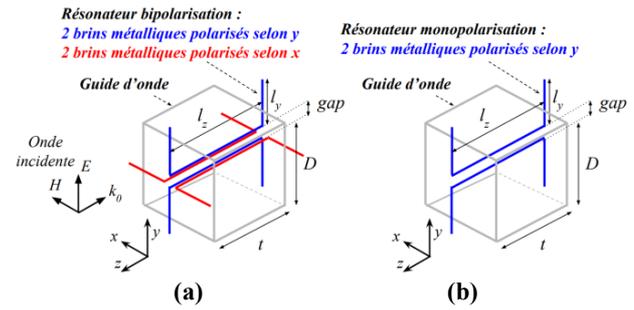


Figure 1. Structure dite du GRI : structure bi-polarisation (a) et structure mono-polarisation (b).

L'analyse de la structure GRI simplifiée en incidence normale a conduit à l'élaboration du circuit équivalent présenté Figure 2.

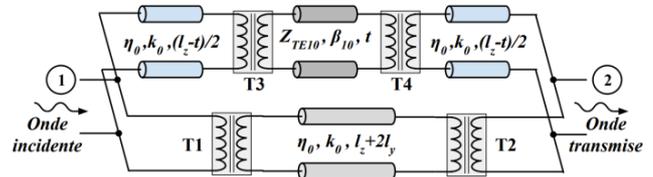


Figure 2. Modèle équivalent du GRI mono-polarisation.

Ce circuit est composé de deux branches principales placées en parallèle, et connectées à leurs extrémités à des ports 1 et 2, correspondant respectivement à l'avant et l'arrière de la FSS-3D. Les 2 branches parallèles représentent les 2 modes de propagation possibles pour traverser la structure : soit par propagation dans le guide, soit par les courants électriques induits sur le résonateur. Les deux branches sont constituées de lignes de transmission sans pertes, ainsi que de transformateurs, représentant les couplages entre les ondes aux accès et les modes excités. Lorsque l'onde incidente frappe la structure GRI, une portion de l'énergie est ainsi couplée à la paire de brins orientés selon y . Un courant s'établit alors le long des conducteurs métalliques de longueur totale $l_z + 2l_y$. La propagation de ce courant est modélisée par la ligne de transmission de longueur $l_z + 2l_y$. La portion d'énergie résiduelle peut être transmise à travers le tronçon de guide d'onde ou réfléchi. T1 et T3 représentent les couplages possibles aux modes induits sur le résonateur et dans le guide. La transmission à travers le tronçon de guide d'onde est prise en compte par la branche supérieure du circuit équivalent. Elle se décompose en fait en trois parties. La partie centrale, de longueur t , correspond à la propagation dans le guide proprement dit (mode TE_{10}). Les parties droite et gauche, de longueur $(l_z - t)/2$, représentent les trajets dans l'air entre les extrémités du guide et les brins verticaux.

4. Résultats

Au premier abord, l'analyse de la structure GRI semble complexe à mener. Les études de chacun des deux sous-ensembles qui composent le GRI, le résonateur filaire et le guide d'onde, ont été menées séparément, afin d'identifier plus facilement leur propre contribution à la réponse de la structure complète sous incidence normale.

4.a. Modélisation du résonateur

La première étape consiste à établir le circuit équivalent du résonateur mono-polarisation sans le guide d'onde, Figure 3. Ce circuit est composé de deux branches en parallèle, connectées aux ports 1 et 2. la branche haute considère la propagation en espace libre, le guide n'étant pas considéré. La branche basse, quant à elle, représente la propagation de l'énergie couplée au résonateur. Les coefficients T1 et T2 sont optimisés pour approcher au mieux la réponse obtenue par simulation *fullwave* de la structure en environnement périodique grâce au logiciel *CST Microwave Studio*. On supposera par la suite que ces couplages ne sont pas modifiés par la présence du guide. Les dimensions géométriques considérées sont présentées dans le Tableau 1. L'épaisseur des conducteurs est fixée à 0.1mm. Les résultats obtenus sont présentés Figure 4.

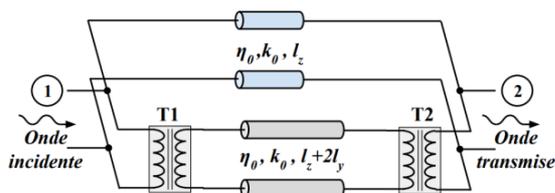


Figure 3. Modèle équivalent du résonateur seul.

l_z	l_y	Gap
7.5	3.75	0.2
t	D	
7	9	

Tableau 1. Dimensions de la structure GRI (mm).

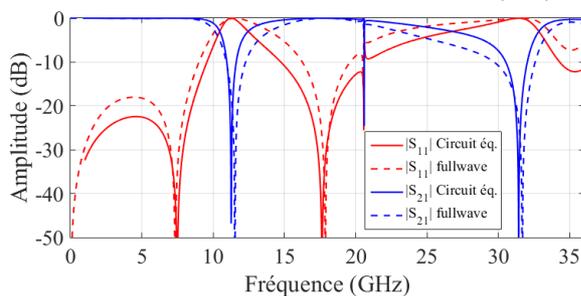


Figure 4. Paramètres S du résonateur seul sous incidence normale.

Ces résultats Fig. 4 montrent que le circuit de la Figure 3 permet de déterminer avec une très bonne précision la position des zéros et pôles de transmission caractérisant le résonateur seul, analysé par simulation *fullwave*, et ce sur toute l'étendue de la plage de fréquences observée.

4.b. Modélisation du guide d'onde

La deuxième étape permet de la même façon de construire le circuit équivalent du tronçon de guide seul, présenté Figure 5.

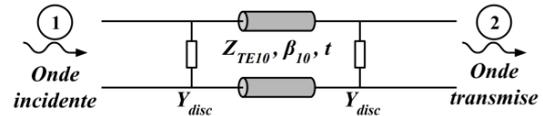


Figure 5. Modèle équivalent du guide seul.

Comme le montre la Figure 5, le guide, de longueur t , peut être modélisé par une ligne de transmission dispersive. Les couplages entre le guide et les ondes se propageant de part et d'autre de celui-ci sont ici représentés par des admittances parallèles notées Y_{disc} . Elles remplacent les transformateurs T3 et T4 du circuit équivalent de la Figure 2. Dans le cas de l'incidence normale, la propagation dans le guide n'implique que le mode fondamental TE_{10} (de constante de propagation β_{10} et d'impédance Z_{TE10}). En effet, la fréquence de coupure des premiers modes supérieurs compatibles à la fois avec la symétrie de la structure et avec l'excitation se trouvent en dehors de la bande considérée dans cette étude.

La valeur d'admittance représentant la discontinuité entre l'espace libre et le guide est déterminée par une méthode analogue à celle utilisée pour les coefficients de couplage du modèle du résonateur seul. Du circuit équivalent de la Figure 5, Y_{disc} peut être exprimée comme fonction des paramètres S du tronçon de guide dans l'air et des paramètres analytiques de la ligne de transmission dispersive. Les paramètres S sont obtenus par simulation *fullwave* du guide en environnement périodique, ce qui permet au final d'extraire la valeur d'admittance correspondant à la discontinuité. Les résultats obtenus du circuit Figure 5, utilisant les valeurs de Y_{disc} ainsi extraites, sont comparés à la simulation *fullwave* du guide d'onde en environnement périodique sur la Figure 6.

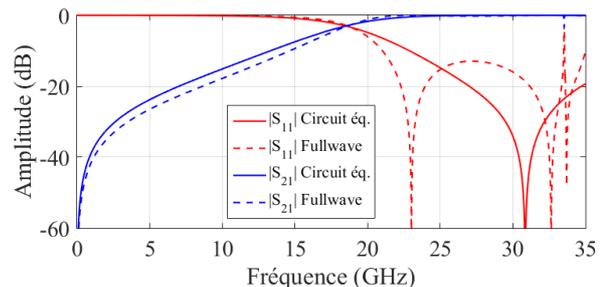


Figure 6. Paramètres S du guide seul sous incidence normale

4.c. Modélisation de la structure complète

La réponse de la cellule GRI complète combine les caractéristiques du résonateur filaire et du guide d'onde, chacun d'entre eux offrant un trajet différent pour permettre à l'énergie d'être transmise. Le circuit équivalent de la structure complète est présenté Figure 2.

Partant du modèle du résonateur seul, Figure 3, deux chemins peuvent être empruntés par l'énergie pour traverser la structure. Un par le couplage aux brins métalliques qui la composent, et un autre par l'espace libre

entre les deux brins orientés selon y . Une première considération consiste à soutenir que la prise en compte du guide d'onde n'affecte pas la circulation des courants électriques induits sur les fils métalliques. En revanche, sa présence affecte la section d'espace libre, la remplaçant par une ligne dispersive d'impédance Z_{TE10} et de constante de propagation β_{TE10} décrite dans le modèle du guide seul, Figure 5. À chaque extrémité de cette ligne sont présents les éléments localisés tenant compte de la discontinuité entre air et guide.

L'étape de validation est effectuée par comparaison du circuit complet (Fig.2) avec une simulation *fullwave* de la FSS-3D (Fig. 1(b)) placée dans une configuration infini périodique. Les résultats sont présentés Figure 7.

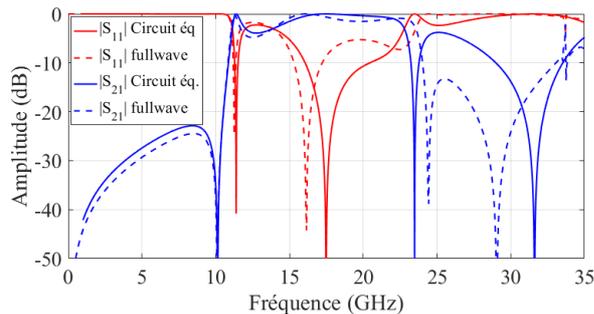


Figure 7. Paramètres S de la structure GRI sous incidence normale.

La réponse en fréquence obtenue présente une caractéristique de type passe bande, démarquée par des bandes de réjection, notamment en bande basse où une forte sélectivité est atteinte. Le modèle reproduit avec une très bonne précision la réponse de la structure jusqu'à 14 GHz. Au-delà, la précision diminue. Toutefois, malgré les dérives observées, le comportement de la structure GRI est bien reproduit, avec l'apparition successive des zéros de transmission en bande de réjection haute. Le circuit équivalent développé constitue donc un modèle comportemental utilisable pour un pré-dimensionnement d'une telle structure, en préalable à une optimisation électromagnétique.

5. Conclusion

L'analyse et la modélisation par circuit équivalent d'une structure sélective en fréquence en trois dimensions a été présentée dans cet article. Ce modèle permet de décrire avec une bonne précision le comportement en réflexion et transmission du Guide à Résonateur filaire Intégré (GRI) dans le cas d'une incidence normale, et trouvera tout son intérêt dans un processus de prédimensionnement.

Références

- [1] B. Munk, "Frequency Selective Surfaces: theory and design", Wiley, 2001.
- [2] R. Mittra, C. Pelletti, "Three-dimensional FSS Elements with Wide frequency and Angular Responses", Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation.
- [3] C. Pelletti, R. Mittra, et al, "Three dimensional FSS Elements with Wide frequency and angular response", Proceedings of 2013 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS).
- [4] C. Pelletti, G. Bianconi, et al, "Frequency Selective Surface with wideband quasielliptic bandpass response", Electronics Letters Volume 49, Issue 17, August 15 2013.
- [5] B. Sanz-Izquierdo, E. A. Parker, "3-D Printing of Elements in Frequency Selective Arrays", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume 62, Issue 12, 2014.
- [6] A. K. Rashid, Z. Shen, "A Novel band Reject Frequency Selective Surface With Pseudo-Elliptic Response", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Volume 58, Issue 4, 2010.
- [7] B. Li, Z. Shen, "Three-Dimensional Bandpass Frequency-Selective Structures With Multiple Transmission Zeros", IEEE Transactions on Microwave Theories and Techniques, Volume 61, Issue 10, 2013.
- [8] J. Zhu, W. Tang et al, "Dual-Polarized Bandpass Frequency Selective Surface With Quasi-Elliptic Response Based on Square Coaxial Waveguide", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Volume 66, Issue 3, 2018.
- [9] S. N. Azemi, W. S. T. Rowe, "Development and Analysis of 3D Frequency Selective Surfaces", Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2011.
- [10] W. Tang, J. Zhu et al, "Waveguide 3-D FSSs by 3-D printing technique", International Conference on Electromagnetics and Advanced Applications (ICEAA), 2016.
- [11] C. Wang, W. Zhuang et al, "Novel Three-Dimensional Frequency Selective Surface with Incident Angle and Polarization Independence", International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2015.