

Modélisation adaptée d'un circulateur microstrip large bande (5–7,5 GHz) réalisé sur substrat tout-ferrite.

M. Francisci¹, L. Huitema¹, T. Monédière¹

¹ XLIM UMR CNRS 7252-, Université de Limoges, Limoges, France

Résumé – Cet article présente un circulateur large bande conçu et réalisé sur un substrat tout ferrite en technologie microstrip. Le dispositif fonctionne dans la zone de champ faible du ferrite sur une bande allant de 5.1GHz à 7.75GHz. La méthodologie de conception prend en compte le caractère inhomogène du champ magnétique statique dans le ferrite: certaines zones sont aimantées à saturation, d'autres partiellement aimantées ou encore totalement désaimantées. Pour modéliser correctement ces variations, plusieurs tenseurs de perméabilité adaptés à chaque état d'aimantation sont employés.

1. Introduction

Les circulateurs à ferrite sont des dispositifs non réciproques à trois ports qui utilisent les propriétés des matériaux ferrites polarisés pour obtenir les phénomènes de circulation. Ils sont très présents dans les chaines de transmission RF souvent placés en amont des antennes. De nombreux travaux existent dans la littérature pour améliorer leurs performances (bande passante, isolation, pertes, caractère multi-bande...) [1, 3, 4, 8]. Ils existent en guide, en technologie tri-plaque ou encore en micro-ruban. Il est par ailleurs important que leur encombrement soit minimal, c'est pourquoi la solution imprimée (quasi planaire) est intéressante [5, 9]. Des solutions sur un substrat « tout ferrite » sont ici recherchées pour simplifier la réalisation. Une bonne modélisation du matériau et de son état d'aimantation est donc nécessaire pour une conception fiable.

L'objectif principal de ce travail est donc de concevoir un circulateur, fonctionnant sur une large bande passante, sur un substrat entièrement en ferrite, tout en identifiant le modèle de perméabilité le plus pertinent pour traduire le comportement du ferrite totalement ou partiellement aimanté. La section 2 rappelle trois modèles de perméabilité pour les matériaux ferrites partiellement ou totalement aimantés. Dans la section 3, un circulateur est développé et mesuré. Les simulations et les mesures sont comparées. Le dispositif fonctionne de 5.1 GHz à 7.75 GHz avec une adaptation et une isolation supérieure à 18dB et des pertes inférieures à 0.6 dB.

2. Modélisation des ferrites dans leurs différents états d'aimantation

2.a. Perméabilité à l'état désaimanté : Modèle de Schloemann

Lorsqu'un matériau ferrite n'est soumis à aucun champ magnétique sa perméabilité (μ_{demag}) est le plus

souvent décrite par le modèle proposé par Schloemann [7].

$$\mu_{demag} = \frac{1}{3} \left\{ 1 + 2\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_m}{\omega}\right)^2} \right\} \quad (1)$$

où $\omega_m = 2\pi\gamma M_s$, M_s est l'aimantation à saturation et $\gamma = 2.8$ MHz/Oe est le rapport gyromagnétique.

2.b. Ferrite partiellement aimanté : Modèle de Green and Sandy

Lorsque le matériau est partiellement aimanté et sa perméabilité doit alors être décrite par un tenseur (2). J.J. Green et F. Sandy [2] ont proposé modèle de perméabilité tensorielle élaboré à partir de mesures effectuées pour divers niveaux d'aimantation. Les paramètres de ce modèle dépendent de la perméabilité de Schloemann de l'aimantation M du ferrite et de son aimantation à saturation M_s .

$$[\mu] = [\mu_0 \overline{\mu_r}] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu' & -j\kappa' & 0 \\ j\kappa' & \mu' & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z' \end{bmatrix} \quad (2)$$

Avec : $\mu' = \mu_{demag} + (1 + \mu_{demag}) \left(\frac{M}{M_s}\right)^{3/2}$,

$$\mu_z' = (1 + \mu_{demag}) \left(\frac{M}{M_s}\right)^{5/2},$$

$$\kappa' = \frac{\gamma(4\pi M)}{\omega}.$$

2.c. Ferrite aimanté à saturation : Modèle de Polder

Lorsque le champ magnétique statique est assez fort pour saturer le matériau son comportement est décrit par le modèle de tenseur de perméabilité de Polder [6] (3).

$$[\mu] = [\mu_0 \overline{\mu_r}] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Avec : $\mu = 1 + \frac{\omega_m(\omega_0 + j\omega\alpha)}{(\omega_0 + j\omega\alpha)^2 - \omega^2}$, $\kappa = \frac{\omega_m\omega}{(\omega_0 + j\omega\alpha)^2 - \omega^2}$

$$\omega_0 = 2\pi\gamma H_i$$

$$\omega_m = 2\pi\gamma M_s$$

Dans ces équations, μ et κ , dépendent du champ interne H_i , de l'aimantation à saturation M_s , de la fréquence $\omega = f/2\pi$ et de α le facteur d'amortissement traduisant les pertes magnétiques. Les parties réelles et imaginaires des éléments du tenseur décrivent deux zones, une zone de champ fort et une zone de champ faible, séparées par la résonance gyromagnétique (GM) [6].

3. Développement d'un circulateur large bande « tout ferrite » : 5-7.5 GHz

La structure étudiée, sur le logiciel CST microwave studio, est présentée Figure 1. Elle est constituée d'un substrat ferrite Y215 ($M_s = 1450$ G; $\varepsilon = 14.7$) de dimensions $30 \times 27 \times 0.8$ mm³. La partie centrale est aimantée à l'aide de deux aimants permanents placés de chaque côté du substrat, afin d'obtenir un champ homogène au centre du circulateur. Il s'agit d'aimants cylindriques Ceramic 8c ($B_r = 4.3$ kG, $bH_c = 2.5$ kOe) de diamètre 14 mm pour une épaisseur de 3.1 mm.



Figure 1. Image de la structure étudiée en simulation.

3.a. Étude par simulations

L'étude magnétostatique montre l'évolution du champ magnétique dans le substrat (Figure 2). Il varie de quelques Oersted sur les bords à 250 Oe sous le conducteur central ce qui met en évidence une polarisation inhomogène du ferrite selon les axes X et Y.

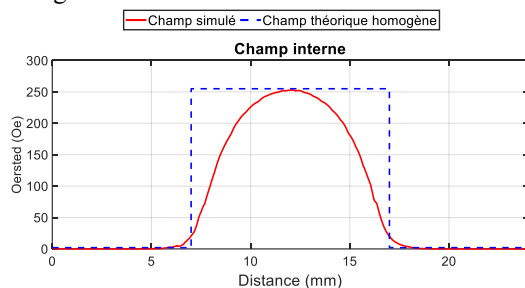


Figure 2. Champ interne calculé à partir d'une simulation magnétostatique.

Pour prendre cela en compte, trois types de simulations couplant électromagnétisme et magnétostatique sont effectuées lors de la conception pour modéliser le comportement hyperfréquences du circulateur, et leurs résultats sont ensuite comparés. Pour modéliser le substrat au mieux, nous prenons comme séparation entre les modèles, un disque du même diamètre que notre aimant permanent, en considérant que le champ reste important à ce niveau.

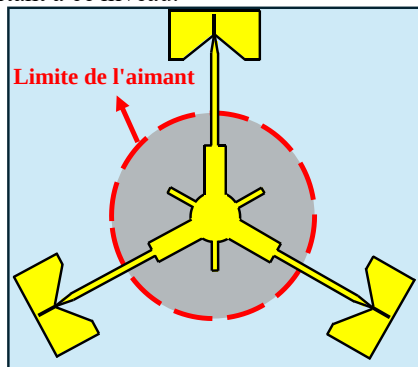


Figure 3. Vue de dessus du circulateur avec l'aimant.

Les différents modèles de perméabilité présentés dans la deuxième section, sont utilisés pour cette analyse :

- Modèle 1 : Polder sous l'aimant et diélectrique sur le reste du substrat

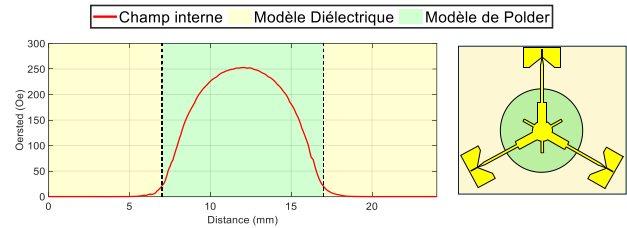


Figure 4. Champ interne H_i associé au modèle 1

- Modèle 2 : Polder sous l'aimant et Schloemann sur le reste du substrat

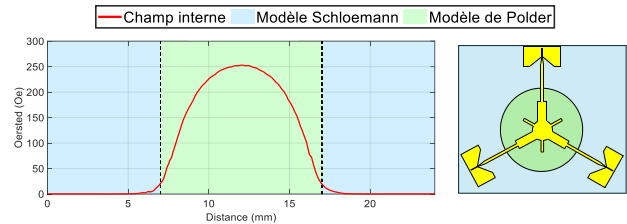


Figure 5. Champ interne H_i associé au modèle 2

- Modèle 3 : Polder sous l'aimant, Green & Sandy dans la périphérie proche de l'aimant, et Schloemann sur le reste du substrat.

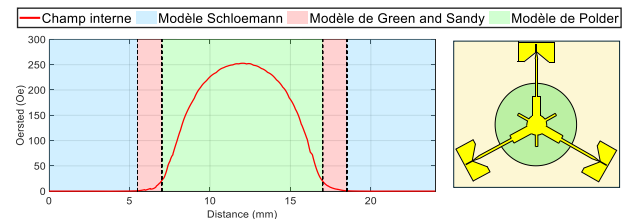


Figure 6. Champ interne H_i associé au modèle 3

Les résultats simulés des paramètres S pour chacune de ces modélisations du substrat ferrite sont comparés Figure 7. De ces résultats, nous pouvons noter que l'emploi de la perméabilité de Schloemann entraîne une modification des paramètres S en bas de bande, lorsqu'on la compare au modèle utilisant un simple diélectrique.

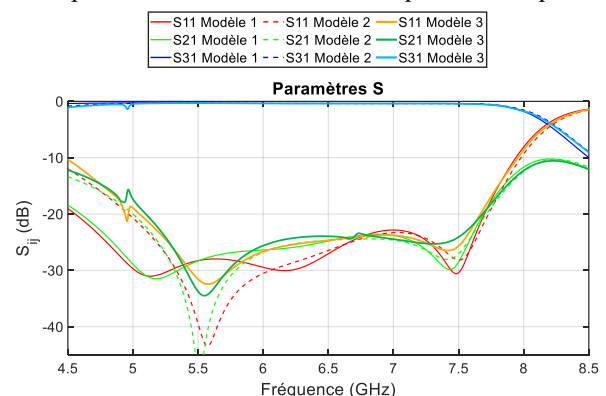


Figure 7. Comparaison des paramètres S pour chaque modélisation du ferrite.

Concernant le modèle 3 (Polder + Green and Sandy + Schloemann), celle-ci présente des comportements proches de ceux obtenus avec le modèle 2 (Polder + Schloemann) avec quelques variations supplémentaires,

notamment l'apparition d'une résonance parasite en bas de bande. Par ailleurs, quel que soit le modèle retenu, les simulations mettent en évidence d'excellentes performances sur une large bande, avec des niveaux d'adaptation et d'isolation supérieurs à 20 dB ainsi que des pertes particulièrement faibles.

3.2 Prototypage et Mesures

Un prototype a été réalisé (Figure 8), ainsi qu'un support de mesure en Rohacell destiné à accueillir le circulateur, les aimants et les plaques d'inox magnétique.

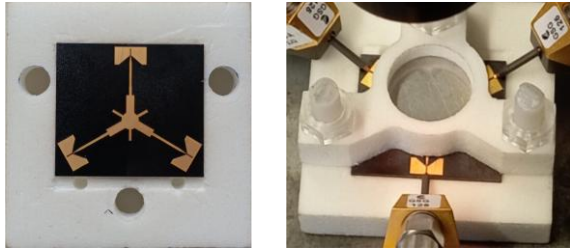


Figure 8. Photographie du prototype du circulateur avant et pendant la mesure.

Les résultats de mesure ont été comparés aux performances fournies par les différents modèles présentés précédemment, ces derniers prenant en compte les dimensions réelles du prototype, notamment celles des lignes et du conducteur central. Le modèle qui se rapproche le plus des mesures est le modèle 3, combinant le modèle de Polder avec ceux de Green & Sandy et de Schloemann. Les résultats de ce modèle sont confrontés aux mesures sur la Figure 9. Le léger décalage en fréquence observé s'explique par un champ interne expérimental légèrement plus élevé que celui considéré dans la modélisation.

Notre modélisation est ainsi validée, et le système développé présente un fonctionnement large bande (41 %), avec des pertes inférieures à 0,6 dB ainsi qu'un niveau d'isolation et d'adaptation de -18 dB.

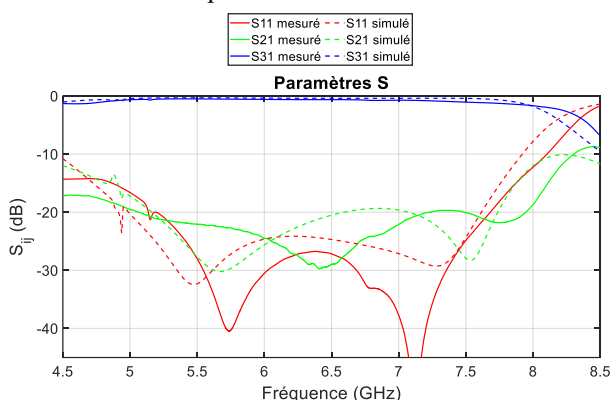


Figure 9. Comparaison entre la co-simulation utilisant le modèle 3 et la mesure des paramètres S_{ij} .

4. Conclusion

Ce papier a proposé le développement d'un circulateur large bande sur substrat tout ferrite. Une modélisation fine du dispositif, intégrant plusieurs modèles de tenseurs de perméabilité, a été effectuée. Une approche consistant à segmenter le matériau en différentes zones selon son état

d'aimantation a été proposée, chaque zone étant associée à un modèle de perméabilité approprié. La comparaison entre simulations et mesures expérimentales a montré une très bonne concordance, validant ainsi l'efficacité de la méthodologie développée.

5. Remerciements

Ces travaux ont été financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet BISTRAU (ANR-21-CE24-0033-01). Ils ont été menés au sein du laboratoire commun INOGYRO entre la PME Inoveos et l'institut de recherche XLIM (<https://inogyro.xlim.fr/>). Les mesures ont été réalisées à la plateforme d'essais PLATINOM d'XLIM, membre du réseau CNRS RF-Net.

Références

- [1] Ambrish Ghadiya et al. "Wide Band Stripline Circulator at Ku Band For Space Applications". 2018 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC). (Nov. 2018), pp. 1–4.
- [2] J.J. Green and F. Sandy. "Microwave Characterization of Partially Magnetized Ferrites". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 22.6 (Juin 1974), pp. 641–645.
- [3] Vincent Olivier et al. "Dual-Band Ferrite Circulators Operating on Weak Field Conditions: Design Methodology and Bandwidths' Improvement". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 68.7 (Juillet 2020), pp. 2521–2530.
- [4] N. Parker, C. Kärfelt, R. Lebourgeois, V. Laur, et L. Roussel, « SMD Compatible Ku-band LTCC Circulators », 2024 54th European Microwave Conference (EuMC), sept. 2024, p. 168-171.
- [5] M. Pinto, L. Marzall, A. Ashley, D. Psychogiou, et Z. Popović, « Design-Oriented Modelling of Microstrip Ferrite Circulators », in 2018 48th European Microwave Conference (EuMC), Sept. 2018, p. 215-218.
- [6] D. Polder and J. Smit. "Resonance Phenomena in Ferrites". Rev. Mod. Phys. 25 (Jan. 1953), pp. 89–90.
- [7] E. Schloemann. "Microwave behavior of partially magnetized ferrites". J.Appl.Phys 41 (Jan. 1970), pp. 204–214.
- [8] H. Turki, L. Huitema, T. Monediere, B. Lenoir, et C. Breuil, « New Concept Validation of Low-Loss Dual-Band Stripline Circulator », IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 67, n° 3, p. 845-850, mars 2019.
- [9] C. Wang, Z. Zheng, S. Sun, et Q. Feng, « A Novel Microwave Ferrite Circulator with Flexible Hybrid Structure and Wide Bandwidth », 2022 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). (Nov. 2022), p. 1-3.