

Modélisation de circulateurs triplaques à ferrite pour des applications bi-bandes et/ou bidirectionnelles

H. TURKI^{1,2}, L. HUITEMA¹, T. MONEDIERE¹, B. LENOIR²

¹ XLIM - Systèmes RF - Equipe Antennes & Signaux - Faculté des Sciences et Techniques
123 Av. Albert Thomas 87060 Limoges Cedex

hamza.turki@unilim.fr - laure.huitema@unilim.fr - thierry.monediere@unilim.fr

² INOVEOS SARL Rue Jacques Chaminade ZAC du Fourneault 19100 BRIVE LA GAILLARDE
blenoir@inoveos.com

Résumé – Ce travail propose la mise au point d'un circulateur triplaque double bande en partant de l'étude des modes propres résonant dans les disques de ferrite. Des simulations électromagnétiques (EM) ont montré qu'il est possible d'obtenir une fonction de circulation sur deux bandes de fréquences différentes en couplant simultanément les modes fondamentaux ($n = \pm 1$) et les premiers modes supérieurs ($n = \pm 2$). Pour les mêmes bandes de fréquences, une fonction de circulation bidirectionnelle a été également démontrée. Deux applications liées aux circulateurs bi-bandes sont enfin discutées.

1. Introduction

Nombreux sont les travaux qui se sont intéressés à l'étude des circulateurs à ferrite [1,4], dont l'utilisation s'avère indispensable dans diverses applications hyperfréquences telles que les radars, la téléphonie mobile ou encore les liaisons satellitaires. Il existe plusieurs topologies de circulateurs à ferrite et la plus étudiée dans la littérature est la topologie triplaque telle que Bosma l'a définie [1]. L'étude de cette structure à jonction-Y a fait l'objet de plusieurs travaux qui ont cherché à exploiter les propriétés magnétiques du matériau ferrite, ayant un comportement spécifique en hyperfréquences. En effet, tout se base sur la connaissance des modes résonants dans les disques de ferrite. En raison de l'anisotropie de ces derniers, les modes se caractérisent par une polarisation circulaire inverse ($e^{j\pm n\varphi}$). Quand la fréquence de travail du circulateur est choisie entre les deux fréquences de résonances de ces modes ($\pm n$), les champs tournant en sens inverses interfèrent et conduisent à une configuration stationnaire qui permet l'obtention de la fonction de circulation. Généralement, ces dispositifs fonctionnent souvent pour les premiers modes résonants ($n = \pm 1$).

Or, certaines applications nécessitent de travailler sur deux canaux fréquentiels différents. Dans un papier récent [5], un circulateur bi-bandes à guide d'onde fonctionnant en bande X a été présenté. Cependant aucune référence sur les circulateurs triplaques bi-bandes n'a été évoquée dans la littérature. Dans ce papier, nous

allons montrer qu'il est possible, dans une configuration particulière, de coupler simultanément les modes $n = \pm 1$ et $n = \pm 2$, ce qui mènera à l'obtention d'une fonction de circulation sur deux bandes fréquentielles distinctes. De plus, deux types de circulations bi-bandes seront étudiés : les circulateurs bi-bandes unidirectionnels (simples) ou bidirectionnels (LH-RH : « Left Handed Right Handed »). Une telle configuration a un grand intérêt dans des applications radars où une seule antenne est liée à la fois au connecteur et au récepteur [5] (Fig.1).

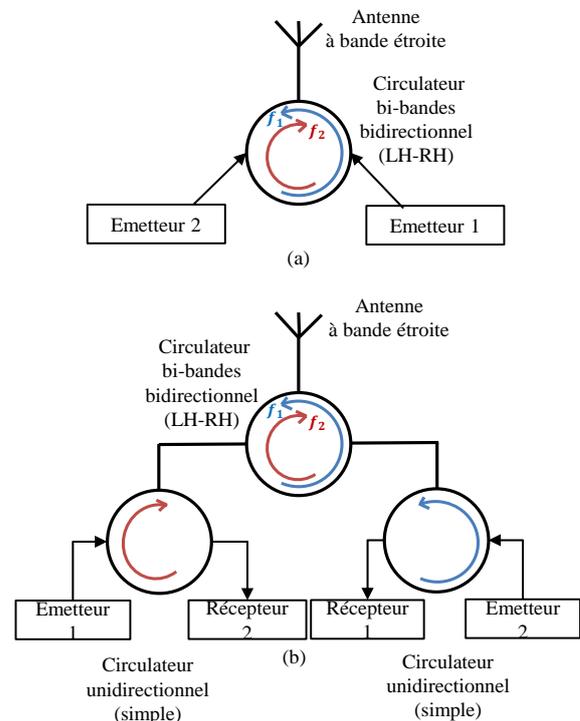


Figure 1. Schémas de principe de deux applications hyperfréquences des circulateurs bi-bandes et/ou bidirectionnels

2. Propriétés des ferrites en hyperfréquences

Les ferrites sont des matériaux magnétiques qui ont un comportement spécifique en hyperfréquences quand

ils sont aimantés par un champ magnétique statique \vec{H}_0 . En effet, sous l'application de ce champ magnétique, le matériau ferrite se caractérise par une perméabilité tensorielle, donnée par l'équation (1) [6] :

$$\mu = \mu_0 \overline{\overline{\mu}}_r = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu & -jk & 0 \\ jk & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dans le cas où le ferrite est dit saturé, les éléments μ et k du tenseur sont fonction de la fréquence f , de l'aimantation à saturation M_s , et du champ magnétique interne H_i défini tel que (2) :

$$H_i = H_0 - N_z \cdot 4\pi M_s \quad (2)$$

Avec N_z le facteur démagnétisant qui est directement lié à la forme du matériau ferrite.

La Figure 2 présente l'évolution des parties réelles et imaginaires de μ et k qui décrit le phénomène de résonance gyromagnétique (GM). Cette dernière est à l'origine d'une interaction onde-matière telle que l'onde EM se propage dans une seule direction. Etant donné que les circulateurs à ferrite fonctionnent en dehors de cette résonance GM, deux zones de fonctionnement sont distinguées : Les circulateurs en champ fort (avant la résonance GM) et les circulateurs en champ faible (après la résonance GM). Ces deux aspects seront discutés dans la partie suivante.

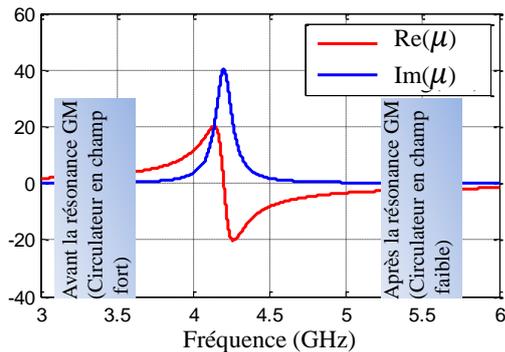


Figure 2. Evolution des parties réelle et imaginaire de μ : élément du tenseur de perméabilité du matériau ferrite

3. Etude des modes de résonance

Les analyses modales des circulateurs à jonction-Y sont basées sur la topologie triplaquée décrite dans la figure 3. Les deux disques de ferrites, placés de part et d'autre d'un conducteur central cylindrique de même rayon, sont aimantés par des aimants permanents selon l'axe (oz).

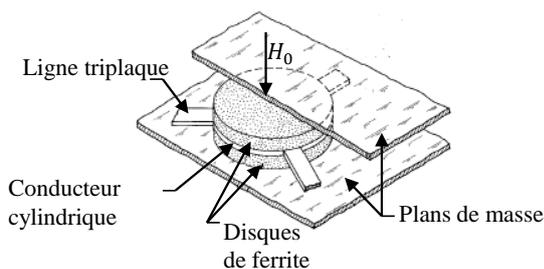


Figure 3. Topologie d'un circulateur triplaqué

En partant de cette structure triplaquée, l'étude de Bosma [1] a mené à la détermination des modes TM indépendants de la hauteur des disques de ferrites (axe d'aimantation (Oz)). Cette étude s'appuie sur la condition de mur magnétique à la périphérie des disques de ferrite (cf. Figure 4-a). D'autres travaux [7] ont pu établir une analyse modale plus rigoureuse qui consiste à développer les expressions des champs EM aussi bien dans le ferrite que dans le diélectrique qui l'entoure, tout en assurant le raccordement des champs à l'interface des deux milieux (cf. Figure 4-b). Ces études ont abouti à la détermination des fréquences de résonances des modes pairs (TM) et impairs (HE) en fonction du champ magnétique interne H_i . Les résultats numériques ont montré une bonne cohérence avec les résultats de mesures (cf. Figure 5).

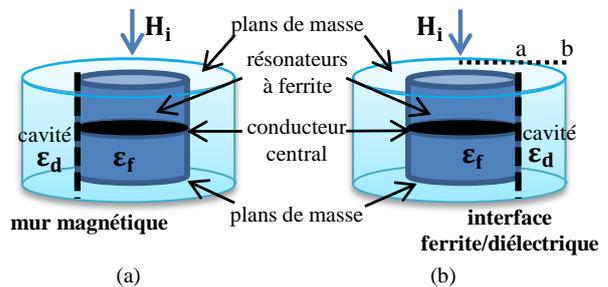


Figure 4. (a) : Méthode de Bosma (b) : Méthode rigoureuse

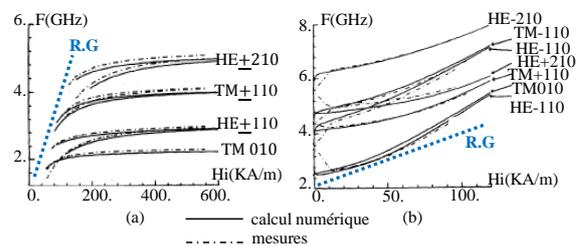


Figure 5. Détermination des fréquences de résonances avec la méthode rigoureuse [7] (a) en champ fort (b) en champ faible. Ferrite de type Y209 ; $a=8\text{mm}$ $b=16\text{mm}$

3.a. Modes en champ faible

Dans ce cas, les modes propres régnant dans les disques de ferrite résonnent à des fréquences supérieures à la résonance gyromagnétique (Figure 5 (a)). Donc, le champ magnétique statique est dit « faible » et sa valeur peut ne pas être suffisante pour que la saturation des disques de ferrite soit atteinte. C'est pourquoi les calculs effectués dans ce cas sont basés sur un modèle de tenseur non saturé [8].

3.b. Modes en champ fort

Etant donné que les disques de ferrite sont censés être saturés dans le cas du champ fort, où les fréquences de résonance des modes sont inférieures à la résonance gyromagnétique, les calculs se sont basés sur le tenseur de Polder [9]. Egalement, les résultats issus du calcul analytique des modes ont été comparés aux résultats de mesure et les abaques sont présentées dans la Fig.5 (b).

3.c. Etude numérique des modes de résonances

Les résultats issus de la modélisation rigoureuse en champ fort ont été reproduits par des simulations EM sur CST Microwave [10]. La valeur du champ interne H_i a été fixée à 180 KA/m (≈ 2260 Oe) (Fig.6).

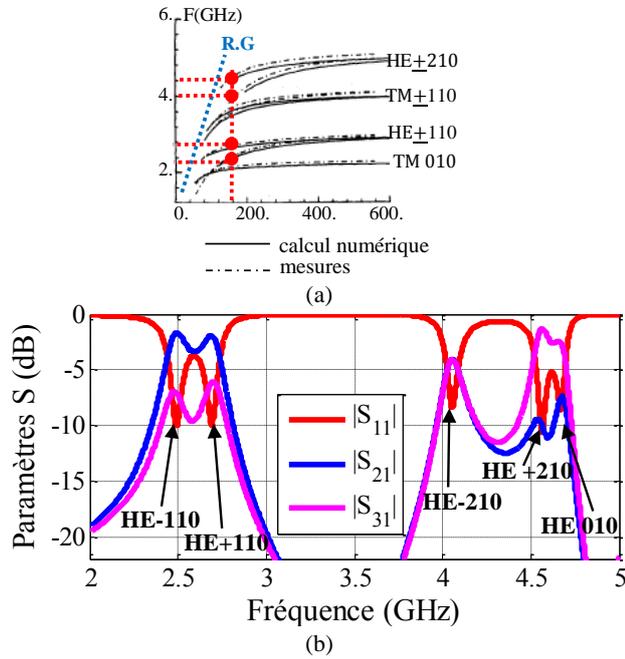


Figure 6. (a) Fréquences de résonance théoriques (b) Détermination des modes de résonance en champ fort par simulation EM ; $H_i=2260$ Oe, $\epsilon_d = \epsilon_0$

Les pics de résonance correspondent bien aux fréquences théoriques des modes impairs HE pour H_i fixé à 2260 Oe. Ceci est vérifié par le tracé des cartographies du champ H (Figure 7), où les différents modes ont été identifiés. Notons que pour un mode HE_{np} donné, n est la variation azimutale et p la variation radiale (en coordonnées cylindriques).

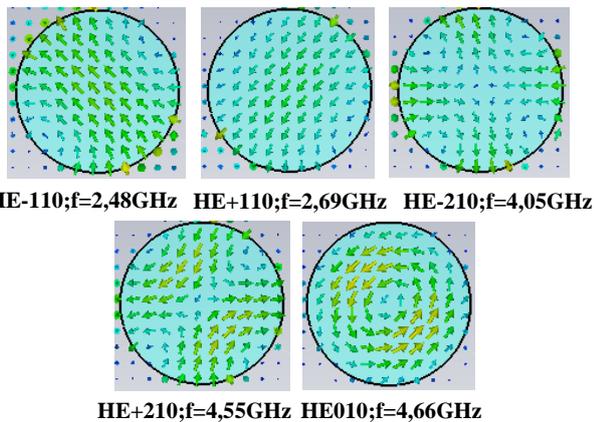


Figure 7. Cartographies du champ H relatives aux différentes fréquences de résonances.

4. Circulateurs bi-bandes

4.a. Circulateur bi-bande et bidirectionnel

La mise au point du circulateur bi-bande est basée sur la configuration des modes propres en champ fort. Ce choix est dû au fait que les modes fondamentaux soient adjacents (anisotropie faible) et bien séparés des modes supérieurs, contrairement au cas du champ faible (cf. Figure 5). Une étude paramétrique sur le champ interne H_i a montré que le mode HE010 (invariant selon ϕ) a tendance à s'intercaler entre les deux modes $HE_{\pm 210}$ pour des valeurs de $H_i < 2100$ Oe, et qu'il arrive à se coupler facilement avec ces derniers. Ceci a mené à l'existence d'un phénomène de circulation bi-bande et bidirectionnel (cf. Figure 8) à $f_1 = 2.5$ GHz et $f_2 = 4.5$ GHz.

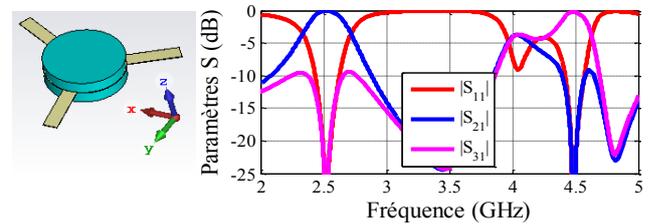


Figure 8. Résultats numériques d'une circulation bi-bande et bidirectionnelle. $\epsilon_d = \epsilon_0$

Les résultats de la figure 8 montrent que les modes résonants supérieurs ont subi une transmission dans le sens inverse de celui des fondamentaux, ce qui a provoqué la circulation bidirectionnelle. Ce phénomène peut être exploité dans des applications double bandes « LH-RH » [5], où deux émetteurs à deux canaux différents sont connectés à une seule antenne à bande étroite.

4.b. Circulateur bi-bande et uni-directionnel

Nous proposons également une solution pour conserver le sens de circulation en rajoutant deux anneaux diélectriques autour des disques de ferrite. La démarche effectuée est la même que précédemment et se base dans un premier temps sur l'étude des modes propres. En couplant ces modes, la propagation de l'onde EM dans le milieu diélectrique favorise la transmission des modes $HE_{\pm 210}$ et le mode HE010 dans le même sens que celui des fondamentaux. Ceci a mené à l'existence d'un phénomène de circulation bi-bande et unidirectionnel (Figure 9) à $f_1 = 2.5$ GHz et $f_2 = 4.5$ GHz.

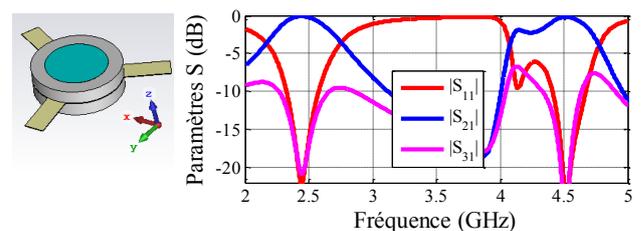


Figure 9. Résultats numériques d'une circulation bi-bande et unidirectionnelle. $\epsilon_d = 14. \epsilon_0$

4.c. Etude magnétostatique

La conception EM du circulateur bi-bandes est basée sur une estimation initiale du champ magnétique interne H_i requis pour le couplage simultané des modes fondamentaux et supérieurs. Les circulateurs à ferrite sont aimantés par des aimants permanents créant un champ magnétique transverse à la direction de propagation pour obtenir le phénomène de circulation. Une étude magnétostatique rigoureuse est donc nécessaire avant la fabrication du circulateur, pour définir et dimensionner les aimants permettant de fournir un champ appliqué qui conduira à l'obtention du champ interne initialement fixé. Nous rappelons que dans les simulations précédentes, la valeur du champ interne a été fixée à 2100 Oe. Le but est donc de retrouver ce niveau de champ magnétique interne par une étude magnétostatique. Les aimants permanents choisis ont une rémanence de 0.45 T et un champ coercitif qui est égal à -3500 Oe. La première étape consiste à calculer le champ appliqué dans l'entrefer, avant l'intégration des disques de ferrites. Le relevé du module du champ \vec{H} est donné par la figure 10.

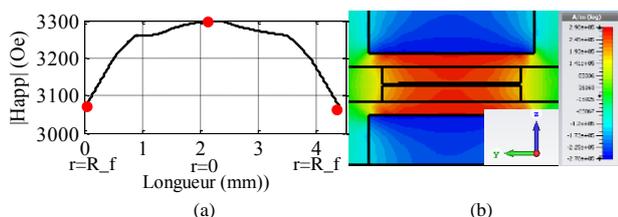


Figure 10. (a) Relevé 1D du module du champ \vec{H}_{app} pour $z=0$ (b) Relevé 2D du module du champ \vec{H}_{app} dans le plan ($x=0$)

La figure 10 montre que le champ magnétique appliqué est non-uniforme. Ceci est dû aux effets de bords non négligeables qui font que le champ est maximal au centre et décroît sur les bords. Les disques de ferrite sont ensuite définis pour déduire la valeur du champ interne requis pour le modèle EM.

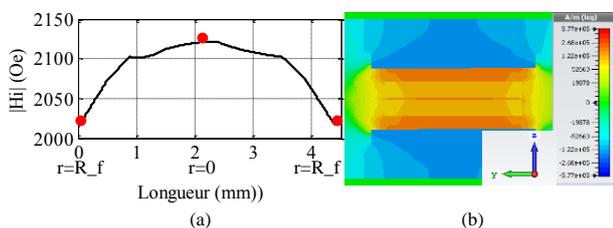


Figure 11. (a) Relevé 1D du module du champ \vec{H}_i pour $z=0$ (b) Relevé 2D du module du champ \vec{H}_i dans le plan ($x=0$)

La sélection et le dimensionnement des aimants ont été effectués d'une manière itérative, tout en fixant les caractéristiques des ferrites étudiés en simulation EM, jusqu'à l'obtention du champ interne souhaité (2100 Oe). Une fois les aimants étudiés, la structure finale est conçue et est en cours de fabrication.

5. Conclusion

Une nouvelle méthode de conception de circulateurs triplaques bi-bandes a été mise en œuvre à travers une analyse modale des résonateurs à ferrite. L'analyse EM des modes propres dans la version triplaque a montré que dans le cas du champ fort, les modes fondamentaux sont adjacents dû à l'anisotropie élevée des ferrites, et séparés des modes supérieurs, ce qui a favorisé l'obtention d'une fonction de circulation à deux bandes fréquentielles distinctes. Cependant, cette approche a montré une sensibilité vis-à-vis du champ magnétique interne.

L'intérêt de ce nouveau concept est de pouvoir répondre aux besoins des applications radar, où le circulateur est employé pour assurer la fonction d'aiguillage du signal, à deux fréquences différentes ou dans un système « Antenne bande étroite/émetteur/récepteur ».

6. Remerciement

Nous tenons à remercier l'A.N.R qui a financé une partie de ce travail, dans le cadre du projet INOGYRO.

Références

- [1] H.Bosma, « On the principle of stripline circulation », Proc.IEEE, vol 109, Jan 1962, pp 137-146.
- [2] C.E.Fay et R.L.Comstock, « Operation of the Ferrite Circulator », IEEE Trans.MTT-13, Jan 1965, pp 15-27.
- [3] J.Helszajn, «The Stripline Circulator, Theory and Practice», 2008 by John Wiley & Sons, Inc.
- [4] A. GUENNOU, P. QUEFFELEC, P. GELIN, and J.L. MATTEI, "Self-biased Y-junction circulators using polycrystalline hexaferrite: An accurate electromagnetic analysis," J. Appl. Phys. 99, 08P505 (2006).
- [5] H.Razavipour, G.Askari, F.Fesharaki, A New High-Power, Dual-Band, E-plane, Ferrite Circulator, IEEE EUROCON, 2009.
- [6] B. LAX et K.J. Button, Microwave Ferrites and Ferrimagnetics, McGraw-Hill, N.Y., 1962.
- [7] M.Latrach, T.Monédière et F.Jecko, «A new design of cylindrical closed triplate ferrite resonators compared with magnetic wall approximation », IEEE Trans. Vol 26 Sep 1990, pp 2856-2862.
- [8] P. Le Roux, "Contribution à l'étude des résonateurs à ferrite. Application à la caractérisation des échantillons gyromagnétiques," Thèse de Doctorat en Electronique, Univ. de Limoges, France, Nov. 18, 1987.
- [9] D. Polder, "On the theory of ferromagnetic resonance," Philos. Mag., vol. 40, 1949, p. 99-115.
- [10] CST Microwave, www.cst.com.