

Nouveau concept de circulateurs triplaques à ferrite pour des applications bi-bandes

Hamza Turki^{1,2}, Laure Huitema¹, Thierry Monédière¹, Bertrand Lenoir², Souad Kirouane¹, Christophe Breuil²

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

² INOVEOS, Rue Jacques Chaminade ZAC du Fourneault 19100 Brive La Gaillarde
hamza.turki@unilim.fr

Résumé — Ce travail propose la mise au point d'un circulateur triplaque bi-bandes original, en partant de l'étude des modes propres résonnant dans les disques de ferrite. Dans ce papier nous montrerons qu'en plus d'obtenir une fonction de circulation en couplant les modes fondamentaux ($n = \pm 1$), il est possible de coupler les modes supérieurs ($n = \pm 2$) afin d'obtenir une circulation sur deux bandes de fréquences différentes. De plus, pour les mêmes bandes de fréquences, une fonction de circulation bidirectionnelle est également démontrée. Deux applications liées aux circulateurs bi-bandes sont enfin discutées et la méthodologie élaborée est validée par des résultats expérimentaux.

I. INTRODUCTION

Les dispositifs non réciproques jouent un rôle central et multiple dans les systèmes de communication puisqu'ils permettent la réception et la transmission d'un signal de manière simultanée, ils protègent le générateur des signaux réfléchis, et permettent l'annulation de la diaphonie entre les chemins d'émission et de réception dans les réseaux d'alimentation d'antenne. La propriété de non-réciprocité est au cœur du fonctionnement de ces dispositifs et peut être obtenue par l'application d'un champ magnétique, d'un champ électrique, d'une quantité de mouvement ou d'un moment angulaire [1]. La solution la plus communément utilisée est d'appliquer un champ magnétique au sein d'un milieu ferromagnétique. En effet, en l'absence de champ magnétique, les domaines magnétiques microscopiques des matériaux ferrites sont orientés dans des directions aléatoires. L'application d'un champ magnétique oriente ces domaines dans la direction du champ magnétique appliqué et permet à la structure de présenter des modes à polarisation inverse ($e^{j \pm n \varphi}$) et donc de casser sa réciprocité [2-4]. Cette polarisation magnétique externe se fait communément par l'ajout d'aimants mais elle peut être évitée par l'utilisation de matériaux auto-polarisés, tels que les hexaferrites [5-6] ou de nanofils ferromagnétiques [7-8]. Une autre méthode pour contourner l'intégration d'un aimant consiste à intégrer des boucles magnétiques dans lesquelles un courant est injecté afin de créer un champ magnétique [9]. Dans ce cas, la technique LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic) est utilisée afin d'insérer plusieurs couches de boucles magnétiques pour créer un champ suffisamment fort et uniforme.

D'autres alternatives à l'application d'un champ magnétique existent et sont basées sur une approche de circuits actifs, souvent compatibles avec des technologies CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor) [10-

13]. Dans ce cas, les effets non-réciproques sont obtenus par le chaînage de transistors, de coupleurs et d'éléments localisés. Ces approches sont cependant marginales car elles souffrent de problèmes de stabilité et ont des performances inférieures aux dispositifs à base de ferrites. Plus récemment, T. Kodera [14-15] a proposé une structure inspirée des métamatériaux afin de créer un phénomène de non-réciprocité sans utiliser un champ magnétique. La cellule unitaire présentée dans l'article [14] est un anneau chargé par un transistor à effet de champ. Ces transistors forcent l'onde à se déplacer dans une seule direction, imitant ainsi la précession du spin électronique dans les ferrites magnétisés. Ces travaux ont permis de réaliser des milieux ferromagnétiques artificiels qui, comme les ferrites réels, peuvent produire une rotation de Faraday ou être utilisés comme substrats dans les dispositifs micro-ondes. Cependant, chaque cellule unitaire possède un transistor et doit donc être alimentée électriquement. De plus, ces dispositifs sont limités en puissance et présentent des effets non-linéaires.

En parallèle de ces développements, l'évolution des front-end RF implique que les dispositifs sans fil doivent fonctionner sur plusieurs bandes de fréquences. Concevoir des dispositifs multi-bandes possédant des propriétés RF identiques sur toutes les bandes, tels que des circulateurs devient donc nécessaire. Seuls deux articles [16-17] présentent un phénomène de circulation sur deux bandes de fréquences distinctes dans lesquelles seuls des résultats de simulation sont proposés. Plus particulièrement, dans l'article [16], un circulateur à guide d'ondes intégrant des résonateurs de ferrites triangulaires permet de présenter une fonction de circulation unidirectionnelle ou bidirectionnelle sur deux bandes de fréquence. De bons résultats de simulations ont été obtenus mais aucune validation expérimentale n'est proposée. Dans l'article [17], les auteurs présentent un circulateur bi-bandes microruban qui, par l'action d'un champ magnétique plus ou moins fort, peut devenir un circulateur mono-bande. Nous avons montré dans des travaux précédents [18] que le couplage des modes fondamentaux et des modes supérieurs pouvait impliquer une circulation bi-bande.

Dans ce papier, nous poursuivons et détaillons cette étude en proposant une méthodologie fiable pour mettre au point un circulateur bi-bandes. En effet, nous allons montrer qu'il est possible, dans une configuration particulière, de coupler simultanément les modes fondamentaux ($n = \pm 1$) et supérieurs ($n = \pm 2$), ce qui mènera à la création du phénomène de non-réciprocité sur deux bandes de fréquence. Afin de prédire de manière précise les fréquences de fonctionnement, l'isolation et les pertes

d'insertion du circulateur ainsi développé, une co-simulation magnéto-statique-électromagnétique sera mise en œuvre et la réalisation d'un prototype validera notre méthodologie de conception.

II. ETUDE DES MODES DE RESONANCE

Les circulateurs triplaques sont constitués de deux disques de ferrite séparés d'un conducteur central et insérés dans deux plans de masse. Le tout est aimanté par des aimants permanents. En présence d'une aimantation axiale appliquée sur les disques de ferrites, la structure présente des modes à polarisation inverse ($e^{j\pm n\varphi}$). Quand la fréquence de travail du circulateur est choisie entre les deux fréquences de résonance 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. L'onde électromagnétique (EM) est alors transmise vers un port et l'autre est isolé.

Les études modales relatives aux circulateurs à ferrite sont assez anciennes. En partant de la structure triplaque, l'étude de Bosma [2] a mené à la détermination des modes TM indépendants de la hauteur des disques de ferrites (axe d'aimantation (Oz)). Elle s'appuie sur la condition de mur magnétique à la périphérie de ces derniers (Fig. 1(a)).

D'autres travaux [19] 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 (Fig. 1(b)). Ces études ont abouti à la détermination des fréquences de résonances des modes pairs (TM) et impairs (HE) en fonction de H_i . Les résultats numériques ont montré une bonne cohérence avec les résultats de mesures (Fig. 2).

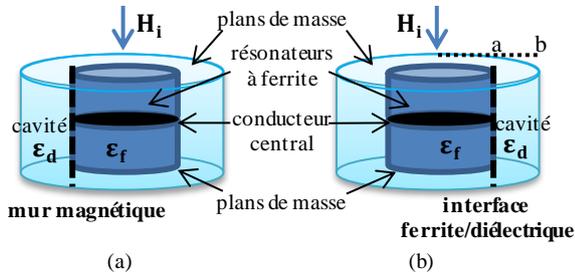


Fig. 1. (a) : Méthode de Bosma [2] (b) : Méthode rigoureuse [19]

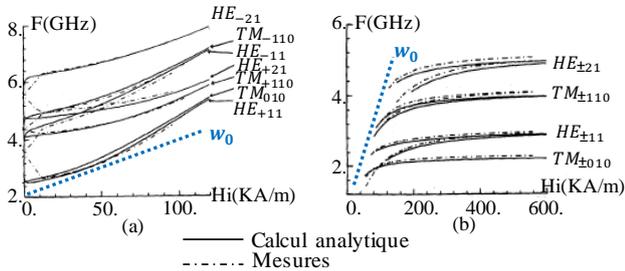


Fig. 2. Détermination analytique des fréquences de résonances avec la méthode rigoureuse [6] (a) en champ fort (b) en champ faible. Ferrite de type Y209 $a=8\text{mm}$ $b=16\text{mm}$; w_0 est la fréquence de résonance gyromagnétique du matériau ferrite

La figure 2 présente deux zones de fonctionnement différentes, en fonction de la position des modes propres par rapport à la résonance gyromagnétique. Les modes en champs fort (générés avant w_0) sont caractérisés par un facteur d'anisotropie faible, dû au fort champ magnétique

appliqué, ce qui rend les modes à polarisation inverse $HE_{\pm 11}$ adjacents, et séparés des modes supérieurs $HE_{\pm 21}$. Dans le paragraphe suivant, ceci justifiera notre choix de travailler en champ fort pour la conception du circulateur bi-bandes.

Les résultats issus de la modélisation rigoureuse en champ fort ont été reproduits par des simulations EM sur CST Microwave [20]. La valeur du champ interne H_i a été fixée à 180 KA/m (≈ 2260 Oe) (Fig. 2(b)).

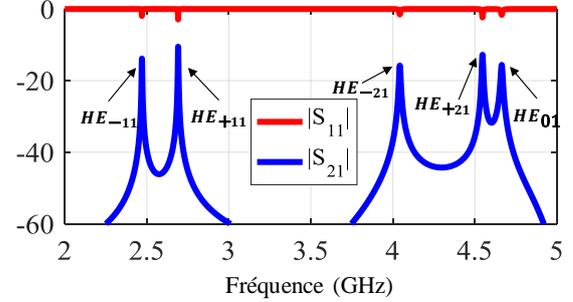


Fig. 3. Détermination numérique des modes de résonance en champ fort par simulations EM. $H_i=180$ KA/m (2260 Oe). $\epsilon_d = \epsilon_0$.

Les pics de résonances correspondent bien aux fréquences théoriques des modes impairs HE pour H_i fixé à 2260 Oe. Il s'avère que seuls les modes HE sont excités par la configuration triplaque. Ceci est vérifié par le tracé des cartographies du champ H (Fig. 4), 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).

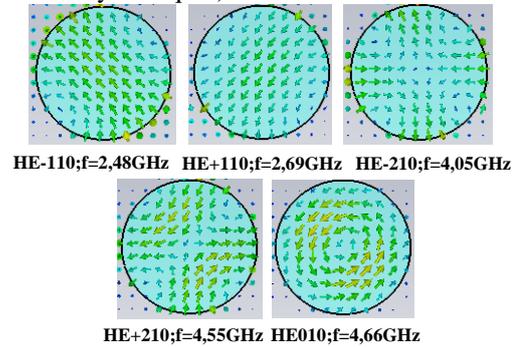


Fig. 4. Cartographies des champs H pour chaque fréquence de résonance.

III. CIRCULATEURS BI-BANDES

A. Circulateur bi-bandes bidirectionnel

Comme a été mentionné dans la partie précédente, la mise au point du circulateur bi-bandes a été basée sur la configuration des modes propres en champ fort (avant la résonance gyromagnétique). La figure 3 montre les modes $HE_{\pm 11}$ autour de $f_1 = 2.6$ GHz et les modes HE_{+21} et HE_{01} autour de $f_2 = 4.6$ GHz. Une étude paramétrique du champ interne a montré que lorsque le mode HE_{01} est généré après le mode HE_{+21} , leur couplage favorise un sens de circulation inversé par rapport à celui des modes fondamentaux. En se basant sur cette condition, la mise au point du circulateur bi-bandes a été menée en optimisant à la fois le champ interne H_i et la forme du conducteur central afin de coupler simultanément ces deux couples de modes et obtenir la fonction de circulation double bandes bidirectionnelle.

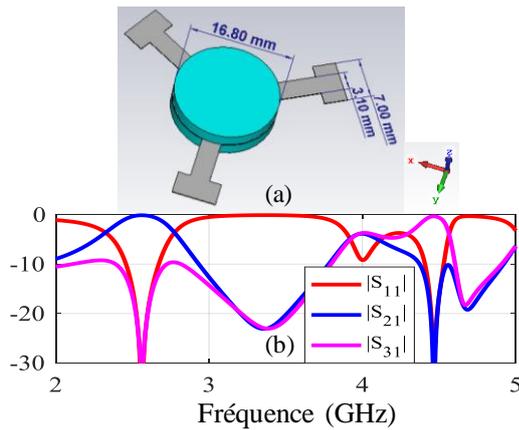


Fig. 5. Résultats numériques d'une circulation bi-bandes bidirectionnelle. (a) Dimensions de la structure interne (b) Résultats de simulation des paramètres S ; Ferrite de type Y209 ; $H_i=2200$ Oe

Ce phénomène peut être exploité dans des applications double bandes « LH-RH » [16], où deux émetteurs à deux canaux différents sont connectés à une seule antenne.

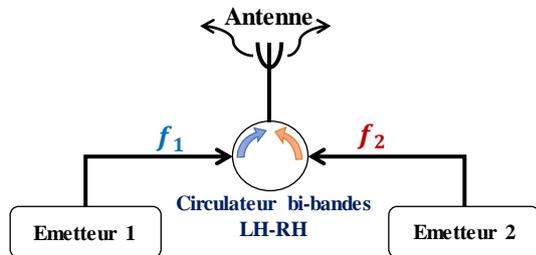


Fig. 6. Première application dédiée aux circulateurs bi-bandes bidirectionnels.

L'approche numérique a été complétée par une étude magnétostatique (MS) [20] afin de prévoir le type et la taille des aimants permanents requis pour la circulation. En effet, 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. Réellement, les circulateurs à ferrite sont aimantés par des aimants permanents selon l'axe transverse à la direction de propagation pour obtenir le phénomène de circulation. Donc, une étude magnétostatique rigoureuse est 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.

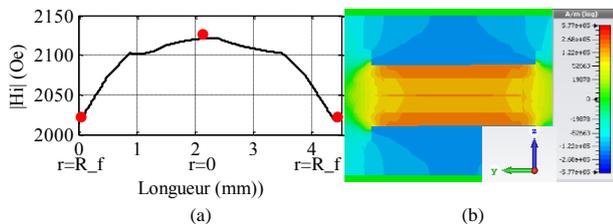


Figure 7. Etude magnétostatique permettant de définir les aimants adéquats au champ interne initialement fixé.

- (a) Relevé 1D du module du champ \vec{H}_i pour $z=\text{hauteur_ferrite}/2$
- (b) Relevé 2D du module du champ \vec{H}_i dans le plan ($x=0$)

Le design complet a été ensuite fabriqué et les résultats de mesures sont comparés à celles des co-simulations MS-EM.

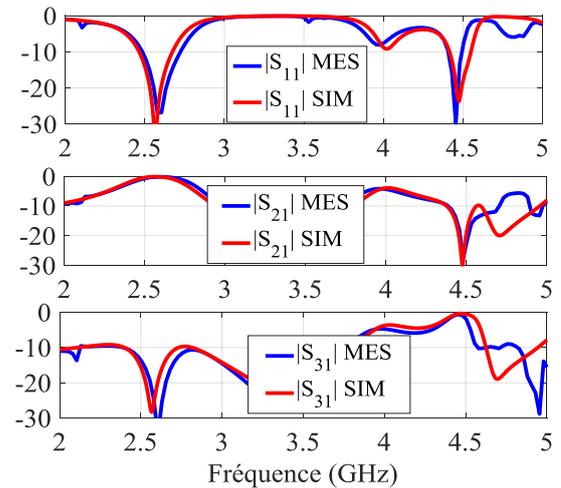


Fig. 8. Validation expérimentale du circulateur bi-bandes « LH-RH ». $f_1=2.6$ GHz et $f_2=4.5$ GHz.

La figure 8 montre une bonne cohérence entre l'approche numérique et les mesures, et ceci a été obtenu sans aucun réglage manuel, ce qui met en valeur la fiabilité de la méthodologie.

B. Circulateur bi-bandes unidirectionnel

Afin de conserver le sens de circulation, des simulations EM ont également montré que le mode HE_{01} doit être généré avant le mode HE_{+21} . Dans ce cas, deux solutions ont été envisagées: soit en diminuant le champ interne jusqu'à ce que cette condition soit respectée ou en rajoutant deux anneaux diélectriques autour des disques de ferrite. Pour garder les mêmes bandes de fréquence que le circulateur bi-bandes bidirectionnel, le choix a été fait sur l'ajout des anneaux diélectrique, vu que la diminution du champ interne aurait provoqué la diminution des deux fréquences de circulation. En suivant la même démarche que précédemment, un phénomène de circulation bi-bande et unidirectionnel a été donc obtenu (Fig. 9) à $f_1 = 2.5$ GHz et $f_2 = 4.5$ GHz.

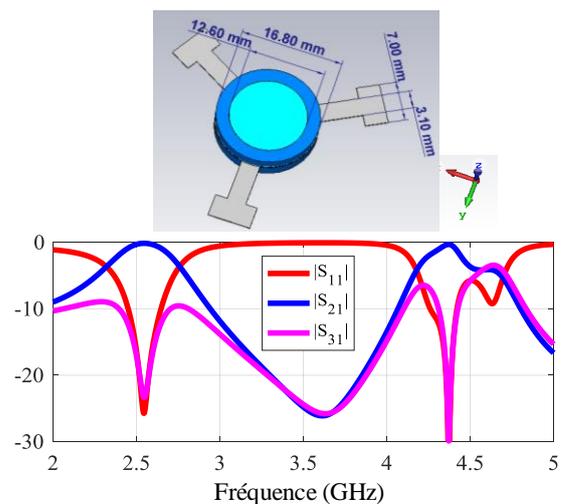


Fig. 9. Résultats numériques d'une circulation bi-bande unidirectionnelle. (a) Dimensions de la structure interne (b) Résultats de simulation des paramètres S ; Ferrite de type Y209 ; $H_i=2200$ Oe

La mise en cascade de ces deux types de circulateurs bi-bandes peut mener à une deuxième application radar, dans laquelle deux modules d'émission-réception, fonctionnant à

deux fréquences distinctes, sont reliés à une seule antenne [16].

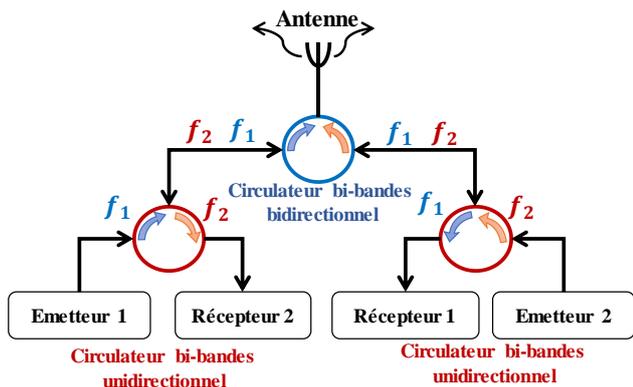


Fig. 10. Deuxième application radar reliant les circulateurs bi-bandes unidirectionnel et bidirectionnels.

L'étude magnétostatique décrite dans le paragraphe précédent a été également employée avant la réalisation du deuxième prototype. Les mêmes aimants sont donc utilisés pour obtenir le même champ interne. Comme est le cas du premier prototype, les résultats expérimentaux montrent une excellente concordance avec les résultats de co-simulations MS-EM.

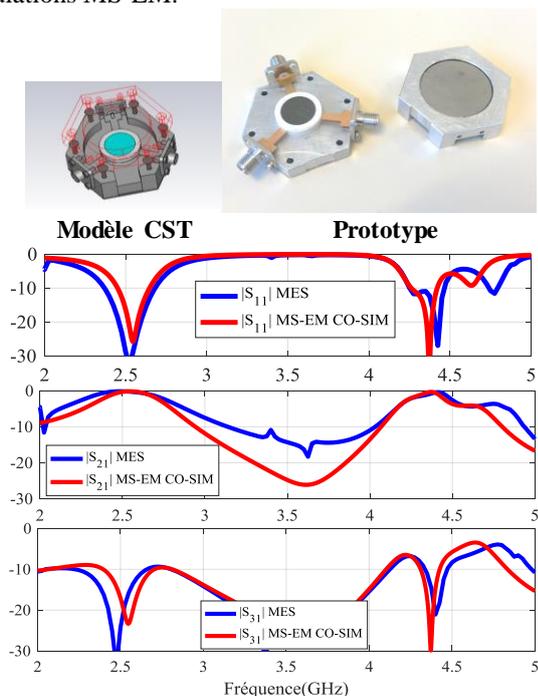


Fig. 11. Validation expérimentale du circulateur bi-bandes unidirectionnel. $f_1=2.6$ GHz et $f_2=4.5$ GHz.

CONCLUSION

Une méthode de conception originale de circulateurs triplaques bi-bandes a été mise en œuvre à travers une analyse modale des résonateurs à ferrite. 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, de deux modules d'émission-réception fonctionnant à deux fréquences séparées.

REMERCIEMENT

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

REFERENCE

- [1] H. B. G. Casimir, "Reciprocity theorems and irreversible processes," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 51, no. 11, pp. 1570-1573, Nov. 1963
- [2] H. Bosma, « On the principle of stripline circulation », *Proc. IEEE*, vol. 109, Jan 1962, pp 137-146.
- [3] C.E.Fay et R.L.Comstock, « Operation of the Ferrite Circulator », *IEEE Trans.MTT-13*, Jan 1965, pp 15-27.
- [4] J.Helszajn, «The Stripline Circulator, Theory and Practice», 2008 by John Wiley & Sons, Inc.
- [5] S. A. Oliver *et al.*, "Integrated self-biased hexaferrite microstrip circulators for millimeter-wavelength applications," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 2, pp. 385-387, Feb 2001
- [6] V. Laur *et al.*, "Self-Biased Y-Junction Circulators Using Lanthanum- and Cobalt-Substituted Strontium Hexaferrites," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 12, pp. 4376-4381, Dec. 2015
- [7] L. P. Carignan, A. Yelon, D. Menard and C. Caloz, "Ferromagnetic Nanowire Metamaterials: Theory and Applications," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no. 10, pp. 2568-2586, Oct. 2011
- [8] A. Saib, M. Darques, L. Piraux, D. Vanhoenacker-Janvier and I. Huynen, "An unbiased integrated microstrip circulator based on magnetic nanowired substrate," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 6, pp. 2043-2049, June 2005
- [9] S. Yang, D. Vincent, J. R. Bray and L. Roy, "Study of a Ferrite LTCC Multifunctional Circulator With Integrated Winding," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 5, no. 7, pp. 879-886, July 2015
- [10] T. Dinc, A. Nagulu and H. Krishnaswamy, "A Millimeter-Wave Non-Magnetic Passive SOI CMOS Circulator Based on Spatio-Temporal Conductivity Modulation," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 52, no. 12, pp. 3276-3292, Dec. 2017
- [11] J. F. Chang, J. C. Kao, Y. H. Lin and H. Wang, "Design and Analysis of 24-GHz Active Isolator and Quasi-Circulator," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 8, pp. 2638-2649, Aug. 2015
- [12] S. A. Ayati, D. Mandal, B. Bakkaloglu and S. Kiaei, "Adaptive integrated CMOS circulator," *2016 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*, San Francisco, CA, 2016, pp. 146-149
- [13] T. Wada *et al.*, "A miniaturized broadband lumped element circulator for reconfigurable front-end system," *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, Tampa, FL, 2014, pp. 1-3
- [14] T. Kodera, D. L. Sounas and C. Caloz, "Magnetless Nonreciprocal Metamaterial (MNM) Technology: Application to Microwave Components," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 3, pp. 1030-1042, March 2013
- [15] T. Kodera, D. L. Sounas, and C. Caloz, "Artificial Faraday rotation using a ring metamaterial structure without static magnetic field" *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, July 2011, Art. ID 03114
- [16] H. Razavipour, G. Askari, F. Fesharaki and H. Mirmohammad-Sadeghi, "A new high-power, dual-band, E-plane, ferrite circulator," *IEEE EUROCON 2009*, St.-Petersburg, 2009, pp. 20-25
- [17] Yuanyuan Zhang, Xixi Feng, Kaiqiang Zhu, Xi Yang and Houmin Li, "An X-band tunable circulator based on Yttrium iron garnet thin film," *2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Beijing, 2016, pp. 425-427
- [18] H. Turki, L. Huitema, T. Monédière, B. Lenoir and C. Breuil, "Methodology to develop a low-loss dual-band stripline circulator," *2017 47th European Microwave Conference (EuMC)*, Nuremberg, 2017, pp. 180-183
- [19] 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.
- [20] CST Microwave Studio, www.cst.com