

Méthode semi analytique de co-conception d'un circulantenne.

M. Francisci¹, I. Benhaddou^{1,2}, V. Olivier² L. Huitema¹, T. Monédiere¹

¹ XLIM Institut de Recherche, Université de Limoges, 87000 Limoges, France

² INOVEOS SARL, Rue Alfred Deshors, 19100 Brive La Gaillarde, France

Résumé – Cet article présente une méthode de co-conception d'un circulateur et d'une antenne, développée afin d'obtenir un couplage idéal entre les deux dispositifs ainsi qu'une réduction de l'encombrement et des pertes associées. La méthode est détaillée et validée par des conceptions conjointes de nouveaux composants hyperfréquences nommés « circulantenne ».

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 généralement connectés à des antennes dans des chaînes de transmissions RF. De plus, le développement des systèmes de communication sans fil a imposé des critères tels que la multifonctionnalité et la compacité à ces systèmes. Des circuits d'adaptation et interconnexion généralement nécessaires entre circulateurs et antennes augmentent l'encombrement et les pertes.

La solution proposée ici consiste à combiner circulateur et antenne en un seul composant intégré visant à éliminer les interconnexions 50 ohms et réduire la taille du dispositif.

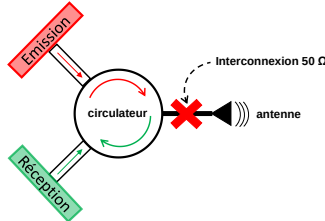


Figure 1. Représentation schématique du système combiné circulateur-antenne.

Seules quelques études sur ces systèmes combinés peuvent être trouvées dans la littérature, telles que les travaux de Adams et al. [1] proposant un circulateur couplé à une antenne Yagi ainsi que les travaux de Benhaddou et al [2] présentant un nouveau composant hyperfréquences appelé « circulantenne » qui assure la fonction de rayonnement et de circulation.

L'objectif principal de ce travail est de proposer une méthode semi-analytique de conception de ces composants et de la valider expérimentalement.

Dans la section 2, la méthodologie semi-analytique sera présentée. Elle combine une méthode de type dé-embedding mise en place par Olivier et al. [4], et des travaux proposés par Young et al. [5]. La section 3 présente deux composants issus de la conception conjointe, un dispositif monobande sur substrat composite

(ferrite + diélectrique) et un dispositif large bande sur même substrat ferrite.

2. Présentation de la méthode semi-analytique

Comme mentionné dans la première section, l'objectif de ces travaux est d'obtenir un dispositif combiné présentant de bonnes performances sur une large bande passante. Pour cela, une méthodologie semi-analytique, développée dans le cadre de la thèse de I. Benhaddou [2], sera utilisée. La première étape de cette méthodologie consiste à déterminer numériquement la matrice impédance d'un résonateur à ferrite puis, à partir de cette matrice, de calculer l'impédance idéale vérifiant les conditions de circulation, afin d'obtenir une adaptation et une isolation parfaites aux ports d'un circulateur.

2.a. Détermination de la matrice d'impédance

En prenant comme base une simulation EM d'un résonateur à ferrite alimenté par des lignes de caractéristiques connues, la méthodologie proposée par Olivier et al. [4] consiste à représenter le circulateur comme un hexapôle de matrice d'impédance $[Z]$ et de le décomposer en un hexapôle de matrice d'impédance $[Z_R]$ (le résonateur à ferrite), connecté à trois quadripôles identiques de matrice $[Z_L]$ qui représentent les impédances des lignes d'accès (cf. Figure 4).

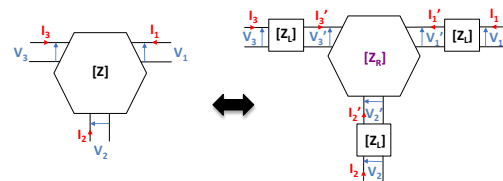


Figure 2. Représentation schématique de l'hexapôle et de son schéma équivalent.

De ces modèles, nous pouvons extraire (4) la matrice $[Z_R]$ dépendant de la matrice $[Z]$ du circulateur simulé, de la matrice d'identité $[Id]$ et des paramètres des lignes d'accès Z_{L11} et Z_{L21} .

$$[Z_R] = \frac{\left(\left(Z_{L21} - \frac{Z_{L11}^2}{Z_{L21}} \right) [Id] + \frac{Z_{L11}}{Z_{L21}} [Z] \right)}{\left(\frac{Z_{L11}}{Z_{L21}} [Id] - \frac{1}{Z_{L21}} [Z] \right)} \quad (4)$$

Les paramètres des lignes peuvent être calculés avec l'impédance caractéristique des lignes Z_c et leur longueur. Ainsi nous pouvons écrire leurs expressions.

$$Z_{L11} = -jZ_c \cdot \cot(L\omega) \quad (4.1)$$

$$Z_{L21} = \frac{-jZ_c}{\sin(L\omega)} \quad (4.2)$$

2.b. Détermination des conditions idéales

Nous considérons une circulation comme idéale, lorsqu'il y a une parfaite isolation entre le port excité et le port isolé, et une transmission de puissance optimale vers le port connecté à l'antenne.

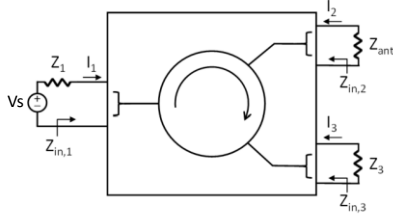


Figure 3. Schéma d'un résonateur à ferrite chargé à ses 3 accès.

Nous considérons un résonateur comme un hexapole linéaire, sans pertes et non-réciproque, excité sur son port 1 et chargé par Z_{ant} (impédance de l'antenne) sur son port 2 (Figure 3). On recherche l'impédance Z_{ant} qui permet d'obtenir une isolation totale du port 3 c'est à dire une valeur nulle du courant (I_3) [5]. Nous pouvons appliquer la loi de Kirchhoff et la loi d'ohm et ainsi écrire l'équation (5).

$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{R11} + Z_1 & Z_{R12} & Z_{R13} \\ Z_{R21} & Z_{R22} + Z_{ant} & Z_{R23} \\ Z_{R31} & Z_{R32} & Z_{R33} + Z_{R23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Et de cette façon, exprimer le vecteur $[I]$ par :

$$[I] = [A]^{-1}[V] = \frac{1}{\det(A)} (com(A))^t [V] \quad (6)$$

De l'équation (6), Nous obtenons l'expression de (I_3) :

$$I_3 = \frac{1}{\det(A)} (Z_{R21}Z_{R32} - (Z_{R22} + Z_{ant})Z_{R31})V_s \quad (7)$$

Avec l'hypothèse que $I_3 = 0$, condition d'isolation idéale, nous obtenons Z_{ant} comme solution à l'équation.

$$Z_{ant} = \frac{Z_{R21}Z_{R32} - Z_{R22}Z_{R31}}{Z_{R31}} \quad (8)$$

Puisque $I_3 = 0$, l'expression (5) est simplifiée et de ce fait nous pouvons réécrire l'expression de I_1 .

$$I_1 = \frac{(Z_{R22} + Z_{ant})}{(Z_{R11} + Z_1)(Z_{R22} + Z_{ant}) - Z_{R12}Z_{R21}} V_s \quad (9)$$

Grâce à cela, il est possible de calculer $Z_{in,1} = V_1/I_1$, impédance à l'accès 1 du résonateur :

$$Z_{in,1} = \frac{V_s}{I_1} - Z_1 = \frac{Z_{R11}Z_{R32} - Z_{R12}Z_{R31}}{Z_{R32}} \quad (10)$$

Le couple d'impédance Z_{ant} et $Z_{in,1}^*$, sont les impédances idéales à présenter aux port 1 et 2 pour avoir une adaptation et une transmission optimum dans le cas où le port 1 est excité. Si un autre port est excité, nous pouvons calculer d'autres couples d'impédances, comme Z_3 et $Z_{in,2}$ pour une excitation du port 2, et Z_1 et $Z_{in,3}$ pour une excitation du port 3 [2].

2.c. Calculs des paramètres S idéaux

De ces résultats, les paramètres S idéaux du système circulateur-antenne peuvent être calculés grâce à l'équation (11).

$$[S] = [F]([Z_R] - [Z_{ref}]^*)([Z_R] + [Z_{ref}])^{-1} \quad (11)$$

En utilisant cette formule provenant des travaux de Pozar [4], nous pouvons obtenir des résultats rapidement en fonction de la matrice d'impédance $[Z_R]$, la matrice normalisée $[F]$ (12), et $[Z_{ref}]$ la matrice précisant l'impédance de référence de chaque port (13).

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2\sqrt{\text{Re}(Z_{ref,1})}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2\sqrt{\text{Re}(Z_{ref,2})}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2\sqrt{\text{Re}(Z_{ref,3})}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[Z_{ref}] = \begin{bmatrix} Z_{ref,1} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{ref,2} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{ref,3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

3. Conception conjointe circulateur-antenne

3.a. Conception monobande

La conception d'un circulateur-antenne monobande a été réalisée. Elle présente le co-développement d'un circulateur à ferrite et d'une antenne Vivaldi. Le dispositif est conçu sur un substrat composite, Alumine ($\epsilon = 9.6$) et ferrite Y39 ($M_s = 800$ G; $\epsilon = 14.6$) de dimensions $31 \times 20 \times 0.6$ mm.

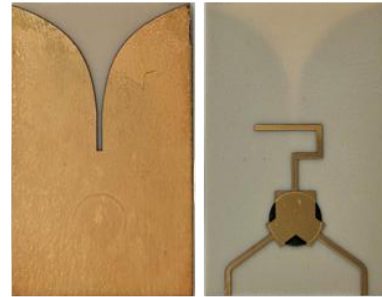


Figure 4. Schéma du circulateur-antenne monobande.

En prenant la matrice d'impédance Z du circulateur simulé afin de concevoir le dispositif couplé, nous pouvons calculer les impédances Z_{ant} et $Z_{in,1}$ des équations (8) et (9) nécessaires. En rouge nous avons l'impédance de l'antenne Vivaldi conçue.

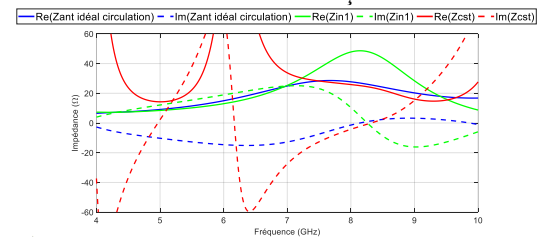


Figure 5. Résultats de la méthode analytique, impédance du dispositif large bande.

Nous pouvons ainsi observer (Figure. 5) que l'impédance d'antenne simulée est, autour de 8 GHz, voisine de celle calculée pour l'antenne idéale par la

méthode analytique. Cela se traduira par un bon fonctionnement du circulantenne à cette fréquence.

Un prototype de ce circulantenne a été réalisé validant cette méthode dans le cas d'un substrat composite. Celui-ci présente une largeur de bande de 7.8% en adaptation et isolation pour un critère à -18 dB (Figure 6).

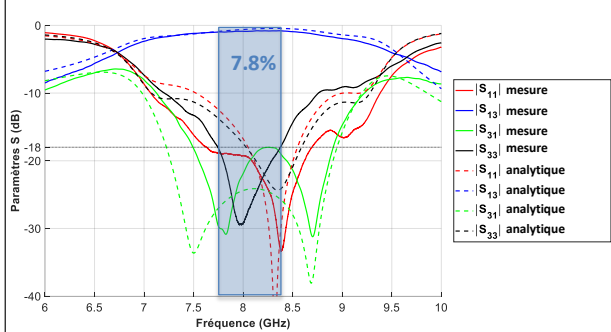


Figure 6. Résultats de mesure du circulantenne monobande comparé à la simulation.

3.b. Conception large bande

Dans le cas du circulantenne large bande, il a été décidé, afin d'obtenir un dispositif compact et moins coûteux, d'utiliser un substrat « tout » ferrite de 50x33x0.8 mm. Pour ce faire, le ferrite Y215 ($M_s = 1450$ G; $\epsilon = 14.7$) a été utilisé pour concevoir le résonateur qui sera associé à une antenne Vivaldi, naturellement large bande.



Figure 7. Photographie du circulantenne large bande.

Tout comme pour le dispositif monobande, nous comparons les impédances calculées analytiquement à l'impédance d'une antenne importée Z_{ant}^{cst} , le but étant d'obtenir un résultat proche de l'impédance idéale d'antenne Z_{ant} . Une prévisualisation des paramètres S du système peut se faire (Figure. 9), sans passer par une simulation EM longue.

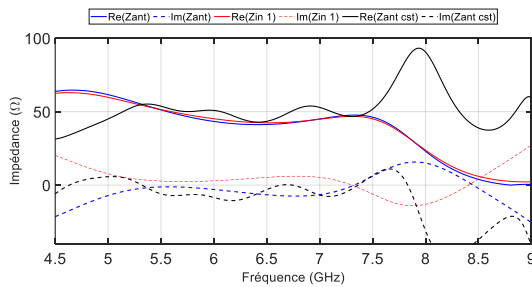


Figure 8. Résultats de la méthode analytique impédance du dispositif large bande

Une bande de fonctionnement de 40% [5.2 GHz – 7.6 GHz] est obtenue, avec -20 dB d'adaptation et d'isolation

et des pertes meilleures que -0.6 dB. Nous pouvons constater (Figure 9) une bonne concordance entre la simulation analytique et la simulation CST. Les mesures du prototype de ce circulantenne sont en cours et seront prochainement disponibles.

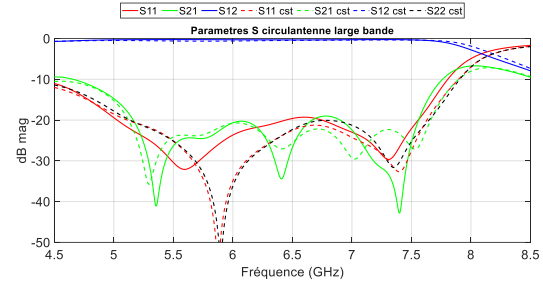


Figure 9. Résultats de la méthode analytique paramètres S comparé à une simulation CST.

4. Conclusion

Ce papier a proposé une méthode semi-analytique de co-conception d'un nouveau composant associant une fonction de circulation et de rayonnement appelé circulantenne. Ces études ont permis de comparer des résultats expérimentaux et théoriques, afin de valider l'efficacité de la méthode dans un cas mono bande puis dans un cas large bande.

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] Ryan S. Adams, Benton O'Neil, and Jeffrey L. Young. "The Circulator and Antenna as a Single Integrated System". IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 8 (2009), pp. 3426–3432.
- [2] Ines Benhaddou et al. "New circulator-antenna concept based on ferrite material". IEEE CAMA Danang (Oct. 2024).
- [3] Vincent Olivier et al. "General Coupling Method for Stripline Ferrite Circulators: Application on Dual-Band Devices With Complex Central Conductor Shape". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 70.7 (July 2022), pp. 3486–3497.
- [4] D M. Pozar, Microwave Engineering, 4th Edition, Wiley, 2011.
- [5] Jeffrey L. Young et al. "Bandwidth optimization of an integrated microstrip circulator and antenna assembly. 1". IEEE Antennas and Propagation Magazine 48.6 (Dec. 2006), pp. 47–56.