

Analyse de structures électromagnétiques comportant des Plasmas par la TLM

TLM extension to electromagnetic field analysis of Plasmas

Arij Farhat, Michel Ney

Lab-STICC – UMR 3192 – Pôle Micro-Ondes et Matériaux – Télécom Bretagne – Technopôle Brest-Iroise,
CS 83818 /29238 BREST Cedex 3
arij.farhat@telecom-bretagne.eu
michel.ney@telecom-bretagne.eu

Mots clés: Plasma, Transmission Line Matrix (TLM), matériaux anisotropes et dispersifs.

Introduction

Notre étude consiste à adapter la méthode TLM aux structures comportant des milieux aux propriétés électromagnétiques dispersives.

Nous proposons une nouvelle technique générale et rigoureuse issue directement des équations de Maxwell [1] afin de prendre en compte tout type de matériau. Elle constitue une généralisation de l'approche de J. Paul [2], qui se base sur une analogie de circuit.

1. Méthode de modélisation du plasma par la TLM

1.1 Plasma

Le plasma est un gaz conducteur (assemblée d'ions positifs et d'électrons libres). Dans ce type de milieu, comme dans les métaux, il existe une pulsation critique au-delà de laquelle la propagation d'une onde électromagnétique au sein du milieu est possible. Cette pulsation, appelée pulsation plasma, s'exprime :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m_e}}$$

où e et m_e représentent respectivement la charge et la masse d'un électron, n_0 étant la densité électronique et ϵ_0 la permittivité du vide.

Les propriétés diélectriques du plasma *anisotrope* étudié sont représentées par le tenseur de permittivité diagonal suivant :

$$\epsilon_p = \epsilon_0 \kappa_p = \begin{pmatrix} \kappa_p & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \kappa_p & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_p \end{pmatrix} \text{ avec } \kappa_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu_p)}$$

où ω étant la pulsation de travail et ν_p la fréquence de collision entre particules.

Pour les dimensions millimétriques choisies $20 \times 1 \times 60 \text{ mm}^3$, l'échantillon de plasma modélisé possède les caractéristiques suivantes :

Échantillon : $\omega_p = 4140 * 10^7 \text{ rad/s}$, $\nu_p = 100 \text{ GHz}$

Cette valeur de ν_p correspond à une pression appliquée au gaz de l'ordre de 100 Torr (0.133 bar). Elle est conforme aux tendances actuelles de la technologie, qui vise à manipuler un plasma à une pression atmosphérique. D'autre part, cette valeur vérifie, dans ce cas de cavités millimétriques, $\nu_p \ll \omega$.

Ce qui permet de simplifier l'expression de la permittivité relative du plasma:

$$\epsilon_p = \epsilon_0 \kappa_p = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \kappa_p & 0 & 0 \\ 0 & 2 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \kappa_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \kappa_p \end{pmatrix}$$

1.2 TLM

La méthode TLM est une méthode d'analyse numérique qui travaille dans le domaine temporel [1]. Cette propriété lui permet de caractériser le dispositif sur une large bande de fréquence en une seule simulation via une transformation de Fourier de la réponse temporelle.

Dans sa forme classique, la méthode TLM ne peut pas prendre en compte un milieu à la fois dispersif et anisotrope, c'est à dire un milieu dont les propriétés physiques dépendent de la fréquence et de la direction spatiale de l'excitation électromagnétique.

En partant des équations de base qui régissent l'évolution temporelle des champs électrique (E) et magnétique (H) dans un milieu dispersif :

$$\begin{bmatrix} \nabla \times \vec{H} \\ -\nabla \times \vec{E} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \vec{J}_{ef} \\ \vec{J}_{mf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_e * \vec{E} \\ \sigma_m * \vec{H} \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi_e * \vec{E} \\ \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi_m * \vec{H} \end{bmatrix}$$

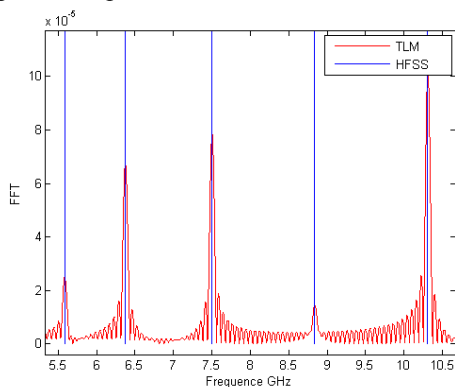
où l'ensemble des paramètres sont définis en [2] et le calcul du tenseur [t] décrivant le matériau isotrope et dispersif est décrit dans [3].

1.3 Résultats

Nous choisissons de modéliser le plasma non magnétisé dans une cavité résonnante. La validation se fait en référence avec les résultats d'un simulateur électromagnétique HFSS [4].

L'étude porte sur la caractérisation des modes TE_{mnp} . Le champ étant considéré constant suivant la hauteur de la cavité du fait de la faible dimension suivant cette direction, les modes TE_{mnp} sont restreints aux TE_{m0p} .

La réponse de la cavité remplie de plasma est obtenue dans le domaine fréquentiel par une transformée de Fourier de la réponse temporelle. Les modes résonnants recherchés sont les modes 101, 102 et 103.



Mode résonnant	Fréquence [GHz] de résonance de la cavité de plasma (HFSS)	Fréquence [GHz] de résonance de la cavité de plasma (TLM)	Différence relative
101	5.5868	5.586	1.4e-4
102	6.3700	6.374	6e-4
103	7.4955	7.503	1e-3

Comparaison des fréquences de résonance simulés sur HFSS (modes 101, 102, 103) et celles issues de la méthode TLM.

La comparaison des valeurs des fréquences de résonance obtenues par les simulations permet d'estimer les différences relatives commises lors de ces simulations.

La faible valeur de cette erreur, de l'ordre de 10^{-3} , confirme donc la bonne modélisation de la propagation de l'onde dans un milieu dispersif.

2. Conclusion

Nous avons étudié, à l'aide de la méthode TLM, la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu aux propriétés dispersives, en occurrence un plasma anisotrope. Ces possibilités ouvrent des perspectives très intéressantes pour la réalisation de circulateurs miniatures fonctionnant en ondes millimétriques ainsi que des antennes patches sur des ferrites non saturés.

Références bibliographiques

- [1] N. Pena, M. Ney «A General and Complete two-dimensional TLM hybrid node formulation based on Maxwell's integral equations», 12th annual review of progress in Applied computational electromagnetics, Naval Postgraduate School, Monterey USA, 1996.
- [2] J. Paul, C. Christopoulos «Generalized material models in TLM\ Part 2: Materials with frequency-dependent properties», IEEE Trans. Antennas Propagation., vol. 47, pp. 1535-1542, Oct. 1999.
- [3] A. Farhat et al, «Extension de la méthode TLM à l'analyse de structures électromagnétiques comportant des milieux dispersifs» XVIèmes Journées Nationales Microondes, 27-29 mai 2009, Grenoble, France.
- [4] 3D EM Field Simulation, HFSS, www.ansoft.com , 2009.