



## L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

### Métamatériaux sous incidence oblique: une nouvelle approche pour extraire leurs paramètres constitutifs

Maciej Śmierzchalski, Kouroch Mahdjoubi

IETR, Université de Rennes 1, France, maciej.smierzchalski@univ-rennes1.fr

Mots-clefs : métamatériaux, bi-anisotrope, déterminer paramètres constitutifs

Keywords: metamaterials, characterization, oblique incident

#### Introduction

Les métamatériaux sont par nature des milieux anisotropes. C'est d'ailleurs cette anisotropie qui a rendu possible la création de la coque d'invisibilité (cloaking) ou qui est recherchée dans les plasmas pour guider l'onde électromagnétique (pour des buts de chauffage par exemple). La question qui se pose tout naturellement, est de savoir comment gauger ou mesurer l'anisotropie des matériaux. L'anisotropie pour un matériau consiste à se comporter différemment selon la direction de la propagation d'onde. Les paramètres constitutifs de ce matériau dépendant ainsi de la direction d'incidence, pour les mesurer, il faut logiquement les étudier sous différents angles d'incidence. Cependant, l'étude de l'interface entre 2 milieux anisotropes pour l'incidence oblique est loin d'être trivial. Certains auteurs [1], ont ramené ce problème à plusieurs problèmes d'incidence normale. A titre d'exemple, les métamatériaux à base de SRR (Split Ring Resonator) possèdent 6 surfaces particulières correspondant aux 6 faces de la cellule « cubique » qui contient le résonateur SRR. On peut alors étudier 6 cas canoniques d'incidence normale à ces surfaces. Bien que très ingénieuse, cette méthode utilise des connaissances a priori sur la structure « cristalline » de la cellule de base qui constitue le matériau. Notre ambition ici est d'étudier le cas général de l'incidence oblique sur l'interface avec métamatériaux bi-anisotropes.

#### 1. Problématique des (méta)matériaux bi-anisotropes

Une technique couramment employée pour évaluer la permittivité ( $\epsilon$ ) et la perméabilité ( $\mu$ ) d'un matériau donné consiste à en illuminer une lame (slab) par une onde électromagnétique, mesurer les coefficients de réflexion et de transmission de l'onde à travers de la lame (appelés souvent les paramètres S), et en déduire  $\epsilon$  et  $\mu$ . Développée à l'origine pour caractériser les milieux isotropes, cette méthode dite NRW [2], est encore applicable aux matériaux anisotropes où les paramètres constitutifs sont tensoriels ( $\overline{\overline{\epsilon}}$  et  $\overline{\overline{\mu}}$ ), mais essentiellement diagonaux (anisotropie uniaxe ou biaxe). Lorsque le milieu est bi-anisotrope et présente un couplage magnétoélectrique ( $\overline{\overline{\xi}}$ ,  $\overline{\overline{\zeta}}$ ) dans les paramètres constitutifs (typiquement les SRR), l'onde électromagnétique peut avoir des impédances caractéristiques  $Z_c$  et des vecteurs d'onde  $k$  différents pour l'onde aller ( $Z_c^+$ ,  $k^+$ ) et pour l'onde de ( $Z_c^-$ ,  $k^-$ ). La méthode classique (NRW et assimilées) ne peut évidemment, à son retour ( $Z_c$  plus fonctionner, mais il est possible de la reformuler pour prendre en compte cette dissymétrie de la propagation [3-5].

Dans le cas d'une bi-anisotropie plus complexe, où les tenseurs  $\overline{\overline{\epsilon}}$  et  $\overline{\overline{\mu}}$  peuvent avoir des éléments non diagonaux, les quatre paramètres S ( $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{22}$ ) issue d'une incidence normale ne sont plus suffisants pour extraire tous les éléments des tenseurs impliqués ( $\overline{\overline{\epsilon}}$ ,  $\overline{\overline{\mu}}$ ,  $\overline{\overline{\xi}}$ ,  $\overline{\overline{\zeta}}$ ). Il faut alors produire d'autres mesures en incluant des incidences obliques. La propagation oblique à l'intérieur de la lame de matériau (slab) est assez bien traitée grâce à l'utilisation des inductions électrique et magnétique ( $D$  et  $B$ ) dans les équations de Maxwell [6]. Or, à l'interface entre le matériau bi-anisotrope et le milieu extérieur, les conditions aux limites s'appliquent non pas sur les inductions  $D$  et  $B$ , mais sur les champs  $E$  et  $H$ . Connaissant la relation tensorielle qui relie  $E$  et  $H$  à  $D$  et  $B$ , on peut imaginer la complexité des expressions obtenues. Ces expressions sont établies pour les métamatériaux bien connus (SRR, Omega, tiges métalliques, ...) ou certains types de matériaux bi-anisotropes et les paramètres S sont obtenus pour l'incidence oblique [7]. Cependant, pour extraire les paramètres constitutifs nous devons, à l'instar de la méthode NRW, inverser ces expressions (ou les « conditions d'interface »). C'est là, que les données manquent dans la littérature.

## 2. Conclusion

Notre travail consiste à inverser les « conditions d'interface » pour une lame de (méta)matériau bi-anisotrope assez généralisé, à l'exception des (méta)matériaux chiraux, afin de déterminer ses paramètres constitutifs en mesurant les paramètres S de la lame, une fois pour l'incidence normale et une fois pour une incidence oblique.

### Références bibliographiques

- 1- X. Chen et al., "Retrieval of the Effective Constitutive Parameters of Bianisotropic Metamaterials", Phys. Rev. E, vol. 71, 046610, 2005.
- 2- A. M. Nicholson et al., "Measurement of Intrinsic Properties of Materials by Time Domain Techniques", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-19, pp. 377-382, 1970.
- 3- L. Zahofeng et al., "Determination of the Constitutive Parameters of Bianisotropic Metamaterials from Reflection and Transmission Coefficients", Phys. Rev. E, vol. 79, 026610, 2009.
- 4- U. C. Hasar et al., "Retrieval Approach for Determination of Forward and Backward Wave Impedance of Bianisotropic Metamaterials", PIER, vol. 112, pp. 109-124, 2011.
- 5- D. R. Smith, et al., "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials," Phys. Rev. E, vol. 71, 036617, 2005.
- 6- J. A. Kong, "Electromagnetic Wave Theory," EMW Publishing, 2005.
- 7- A. Serdyukov, et al., "Electromagnetics of Bi-anisotropic Materials, Theory and Applications", Electrocomponent Science Monographs, vol. 11, Gordon and Breach, Amsterdam, 2001.