Nouvelle méthode pour trouver le meilleur centre de décomposition multipolaire d'une source électromagnétique en champ proche

Zhao Li, Arnaud Bréard, Laurent Krähenbühl

Nouvelle méthode pour trouver le meilleur centre de décomposition multipolaire d'une source électromagnétique en champ proche

Zhao LI[1], A. Bréard[1] et L. Krähenbühl[1]

[1]Université de Lyon – Ampère (CNRS UMR5005), ECL, 69134 Écully, France, zhao.li@doctorant.ec-lyon.fr

Résumé

La caractérisation des interférences électromagnétiques (EMI) générées dans les systèmes d'électroniques de puissance est une activité importante dans la compatibilité électromagnétique. En utilisant la méthode de développement multipolaire en harmoniques sphériques, le couplage magnétique entre deux éléments peut être déterminé à partir de leurs modèles équivalents. Cependant, ce développement multipolaire dépend de la position du centre de décomposition. Un mauvais choix de ce centre peut associer à une source simple un modèle équivalent très compliqué. Les calculs suivants du champ magnétique et de l'inductance mutuelle deviennent également plus complexes. Pour un nombre fini de mesure on cherche à reconstruire une source multipolaire avec un nombre d'ordre et de moment maximum supposé. Une erreur d'estimation du centre équivalent de la source va entrainer une erreur dans la reconstruction du modèle équivalent. Dans ce papier, une nouvelle méthode pour trouver le meilleur centre de décomposition est proposée.

.

1. Introduction

Dans les comportements de Compatibilité Electromagnétique (CEM) de convertisseurs électroniques de puissance, il est important de déterminer le couplage à champ proche entre deux composants complexes. Cependant, les problèmes CEM sont souvent traités après la mise au point d'un prototype, ce qui conduit à des coûts supplémentaires et à des retards importants avant la mise en fabrication. Afin de prendre en compte les problèmes de CEM dès la phase de conception, une méthode prédictive basée sur des développements multipolaires en harmoniques sphériques du rayonnement en champ proche autour de l'élément a été développée dans notre laboratoire [1]. A partir des coefficients harmoniques d'une source, nous pouvons représenter les champs électromagnétiques autour de la source sous la forme d'une somme infinie (tronquée) de termes connus standards (dipôle, quadripôle, octopôle…). Lorsque deux sources sont identifiées en harmoniques sphériques, nous pouvons utiliser directement ces développements pour déterminer leur couplage via le calcul de l'inductance mutuelle en fonction de leurs positions respectives [2].

Un nouveau système de mesure a été proposé [3]. Ce dernier permet de mesurer les composantes harmoniques de tous les moments contrairement à l'ancien banc [2]. La précision de calculs suivants pour les champs magnétiques ou inductances mutuelles est directement reliée à l'ordre maximal considéré pour la reconstruction d'une source [4]. Pour une source complexe, plus l'ordre est grand, meilleure est la précision que nous aurons pour le champ ou la mutuelle, mais les calculs peuvent devenir plus compliqués. Pour un dispositif réel comme une carte électronique, nous nous trompons très facilement sur la localisation du centre de la source équivalente. Des fois, un mauvais choix du centre de décomposition d'une source simple peut aboutir à un modèle équivalent très complexe en harmoniques sphériques. Par exemple, un dipôle décalé de son centre de décomposition (comme montré dans la Figure 1) peut être équivalent à une source qui possède un grand nombre de coefficients d'ordres élevés. La sphère représentée Figure 1 est la sphère d'intégration, sur laquelle nous souhaitons exprimer la source en harmoniques sphériques.

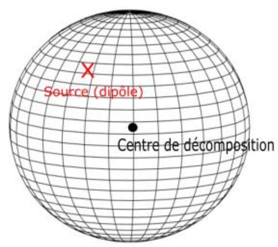

Figure 1: Source décalée de son meilleur centre de décomposition

Dans cet article, une nouvelle méthode est proposée, qui permet de trouver le meilleur centre de développement multipolaire. Ce dernier correspond au modèle équivalent le plus simple, qui permet de beaucoup réduire les calculs pour les inductances mutuelles et les champs magnétiques, et même d'améliorer leur précision grâce.

2. Principe d'approche

La translation d'une source en harmoniques sphériques est basée sur « Addition Theorem for Vector Spherical Harmonics » [5]. Ce théorème consiste à calculer les symboles de Wigner 3j souvent utilisés souvent dans le domaine de mécanique quantique. Il existe plusieurs formules pour le calculer, mais certaines ne sont pas stables numériquement. En effet, la formule de Racah [6] contient des produits de factorielles qui peuvent entraîner un débordement numérique lorsque l'argument est trop important. L'algorithme que nous avons utilisé pour calculer le symbole de Wigner 3j est identique à celui développé dans [5]. Il s'agit d'un algorithme récursif donné par Luscombe et Luban [7] et amélioré pour tenir compte de trois cas particuliers pour lesquels l’algorithme de départ n’était pas adapté.

L’idée est de déterminer les expressions de chaque coefficient en fonction de tous les autres termes et également en fonction de la distance de translation suivant une direction. Un exemple de la translation d’un dipôle magnétique suivant l’axe z est montré [3]. L’impact sur le coefficient de l’expansion multipolaire correspondant est représenté sur la Figure 2 : le coefficient dipolaire n’est pas modifié, la translation influence essentiellement le premier coefficient plus élevé (Q_{20}) avec un comportement linéaire de la pente $K_{1,2}$=0.447. L’impact est plus faible pour les ordres supérieurs.

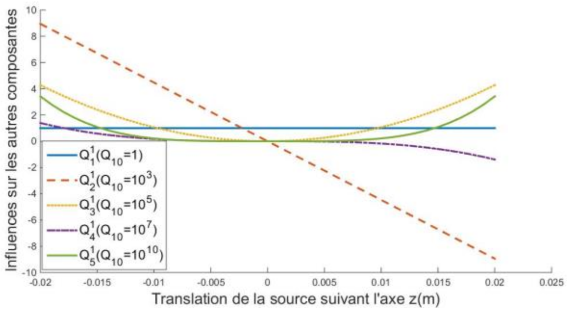

Figure 2: Influence d'un décalage à partir de -2 à 2 cm d'un dipôle pour les ordres supérieurs. Rapport d'amplitude: 10^3 pour Q_{20}, 10^5 pour Q_{30}, 10^7 pour Q_{40} et 10^{10} pour Q_{50}

Des résultats équivalents ont été obtenus pour quadripôle et octopôle : la translation influence essentiellement le premier coefficient plus élevé (Q_{30} pour quadripôle, Q_{40} pour octopôle,…), avec le même comportement linéaire. Après avoir obtenu toutes ces relations (au nombre de $n^2(n+2)^2$ où n est l’ordre maximal du développement) [4], nous cherchons un décalage qui permet de minimiser toutes les composantes d’ordre élevé. Un exemple simple est montré ci-dessous.

Un dipôle parfait ne possède normalement qu’une seule composante: Q_{10}=1. Si nous le décalons suivant l’axe z de 0.5m, la source devient :

Q_{10}	Q_{20}	Q_{30}	Q_{40}
1.016	-0.390	0.164	-0.073

Tableau1 : Source initiale à simplifier

Après avoir appliqué notre démarche pour trouver le meilleur centre de décomposition, nous trouvons que la translation qui permet de simplifier la source est de -0.498m suivant l’axe z, ce qui correspond bien à un dipôle. La source après le décalage est :

Q_{10}	Q_{20}	Q_{30}	Q_{40}
1.084	-0.001	0.003	0.001

Tableau2 : Source simplifiée après décalage

Nous vérifions bien que la source après ce décalage ne possède qu’un seul terme Q_{10}. La source et les calculs pour ses champs et son inductance mutuelle avec un autre élément sont tous beaucoup plus simples par rapport à la source initiale. Comme nous avons tronqué tous les composants d’ordre 5 et supérieur, il est nécessaire de comparer les champs magnétiques autour des deux sources. Ici, l’erreur quadratique normalisée est calculé entre eux : ε=1.35%. Cette valeur peut encore être réduite en montant l’ordre de développement multipolaire. Des fois, nous n’arrivons pas à trouver un décalage qui permet d’annuler tous les termes d’ordre élevé ou l’erreur quadratique entre la source initiale et la source simplifiée est trop important. Dans ces deux cas, nous pouvons conclure que le centre de décomposition est bien choisi et la source ne peut plus être simplifiée.

3. Conclusion

Une nouvelle approche pour trouver le meilleur centre de décomposition en harmoniques sphériques a été proposée. Ceci permet de beaucoup simplifier la source complexe et réduire les calculs pour ses champs et son inductance mutuelle avec une autre source. Dans cet article, un exemple d’un dipôle décalé vers l’axe z est montré, la même démarche peut être généralisée à toutes les autres directions et à n’importe quelle source. Cette méthode peut aussi être utilisable pour la localisation des éléments électroniques dans une boite noire.

4. Remerciements

Ce travail, financé par l’Agence Nationale de la Recherche (ANR) « PolHar-CEM ».

5. Bibliographie

[1] S. Zangui, K. Berger, C. Vollaire *et al.*, “Modeling the near-field coupling of EMC filter components,” *Proc. of the IEEE International Symposium on EMC*, pp. 825-830, 2010.

[2] T. Q. V. Hoang, A. Bréard, et C. Vollaire, “Near Magnetic Field Coupling Prediction Using Equivalent Spherical Harmonic Sources,” *IEEE Trans. on EMC*, Vol. 56, n°6, pp. 1457-1465, 2014.

[3] A. Bréard, F. Tavernier, Z. Li et L. Krähenbühl, “New Measurement System of Magnetic Near-field with Multipolar Expansion Approach”, *Compumag, Montréal, Jun 2015, pp.621*

[4] B. Vincent, O. Chadebec, J.L. Schanen, K. Berger, *et al.*, “Identification of Equivalent Multipolar Electromagnetic Sources by Spatial Filtering,” *IEEE Trans. on Magnetics.*, vol. 46, no. 8, pp. 2815-2818, 2010.

[5] B.C.Brock “Using Vector Spherical Harmonics to Compute Antenna Mutual Impedance from Measured or Computed Fields”, *Sep 2000*

[6] Clebsch-Gordan (C.-G.) Coefficients and '3j' *Symbols. A. Messiah, Appendix C.I in Quantum Mechanics, Vol. 2. Amsterdam, Netherlands: North-Holland, pp. 1054-1060, 1962*

[7] James H. Luscombe, Marshall Luban “Simplified recursive algorithm for Wigner 3j and 6j symbols”. *Physical Review E, Vol. 57, No. 6, June 1998, pp7274-7277*