

LA MODÉLISATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE D'ANTENNES SPATIALES

THIERRY KOLECK¹

Abstract. The space antennas are subject to hard design constraints. Being critical systems, they must comply with the installation on a spacecraft in the space environment. The numerical modelisation is widely used in antenna design. However, some problems needs to improve current numerical techniques in order to meet the future space systems.

Résumé. Les antennes embarquées sur les satellites sont soumises à de très fortes contraintes de développement. Etant un système critique d'un satellite, elles doivent répondre à des spécifications sévères tout en étant compatibles de l'installation sur une plateforme soumise à l'environnement spatial. La modélisation numérique est largement utilisée pour la conception de ces antennes. Toutefois, certains problèmes nécessitent d'améliorer les modèles numériques actuels pour répondre aux besoins des futurs systèmes spatiaux.

INTRODUCTION

L'utilisation des satellites est omniprésente dans la société moderne. Inconsciemment, nous utilisons quotidiennement des informations venant de l'espace. Afin d'illustrer ce fait, nous pouvons citer des grandes familles d'applications de l'espace :

- Les missions de télécommunications : télédiffusion, télécommunication avec les mobiles, transmission multimédia haut débit, ...
- Les missions de localisation/navigation : GPS, Galileo, Argos, ...
- Les missions d'observation de la Terre : météorologie, étude des océans, étude de l'atmosphère, climatologie, ...
- Les missions de défense : observation radar ou optique, écoute électromagnétique, ...
- Les missions scientifiques: astronomie, sonde d'exploration interplanétaire, sonde de mesure in-situ, physique fondamentale, ...

Quelque soient leur applications, tous les satellites utilisent des ondes électromagnétiques pour assurer la liaison avec la terre ou pour remplir leurs missions. Les antennes embarquées sont donc des composants vitaux de ce système. Etant le passage obligé des informations traitées par le satellite, elles sont soumises à des spécifications sévères et sont directement liés aux performances globales du satellite.

1. LES SPÉCIFICITÉS DES ANTENNES SPATIALES

Le vaste champ d'application des systèmes spatiaux [1] implique l'utilisation de technologies d'antennes très diverses, allant des plus simples aux plus complexes comme les antennes actives. De plus, ces applications couvrent un très large spectre de fréquences allant de quelques dizaines de mégahertz au térahertz.

¹ CNES - 18 avenue Edouard Belin 31401 Toulouse Cedex 9 France

Dans le domaine des télécommunications, les antennes font parties des éléments les plus importants et les plus critiques du satellite. Elles assurent la transmission à très haut débit des informations vers un grand nombre d'utilisateurs, doivent pouvoir se reconfigurer en vol pour s'adapter à la demande des utilisateurs et avoir un très haut niveau de fiabilité [2] [3]. De leurs caractéristiques dépendent directement les performances du système. Ces spécificités ont un impact direct sur les performances radioélectriques des antennes en termes de gain, de polarisation croisée ou de niveau de lobes secondaires. Ces antennes sont basées sur des technologies d'une grande complexité. Elles peuvent intégrer des éléments actifs (amplificateurs, filtre adaptatifs, convertisseurs de fréquence) et des structures rayonnantes complexes (réseau d'éléments rayonnants, réflecteur conforme,).

En observation de la Terre, les charges utiles doivent assurer les fonctions de radar à synthèse d'ouverture, d'altimètre ou de sondeur atmosphérique. Les types d'antennes et les fréquences utilisés sont donc extrêmement variés. De plus, devant l'augmentation des résolutions des instruments optiques et radar, il est nécessaire de développer des antennes de télémétrie capables d'assurer un lien très haut débit pour transmettre les images vers les stations terrestres. Afin d'obtenir un débit suffisant (supérieur 300 Mbits/sec) et être compatibles des satellites en orbite basse, ces antennes seront nécessairement des antennes à pointage électronique. Plusieurs concepts sont envisageables comme les antennes actives, les antennes à commutation ou les réseaux réflecteurs.

Les satellites scientifiques occupent un vaste champ d'exploration de l'univers. Dans le domaine des radiofréquences, on va trouver des radiomètres ou des radiotélescopes spatiaux. Les antennes utilisées sont donc très spécifiques, avec des problèmes propres essentiellement dus à l'utilisation de fréquences extrêmement élevées (jusqu'au térahertz).

Devant toutes ces applications très diverses, les concepteurs d'antennes spatiales doivent donc faire face à une très grande variété de types d'antennes :

- les sources primaires : cornets, antennes imprimées, antennes hélices, ...
- les antennes à réflecteur : mono ou multi réflecteurs, réflecteurs bibrilles, réflecteurs formés, ...
- les antennes réseaux : réseau plan, réseau conforme, réseaux réflecteurs, ...

Quelque soit l'application, un satellite en orbite doit être suffisamment fiable pour assurer sa mission durant toute la durée de vie pour lequel il a été prévu. Il n'y a pas de réparation possible dans le cas où un équipement tomberait en panne. En particulier, pour les antennes qui sont les points de passage obligés de l'information, une panne signifie une perte du satellite ou, dans le meilleur des cas, une dégradation significative des performances. De ce fait, ces contraintes de fiabilité sont à intégrer dès la phase d'étude de faisabilité et ont un impact direct sur la conception électromagnétique de l'antenne.

L'environnement spatial, très hostile, impose des contraintes supplémentaires à l'antenne. Celle-ci devra supporter des gradients thermiques très importants (de -150°C à $+200^{\circ}\text{C}$), une dépressurisation rapide et le vide spatial, des contraintes mécaniques sévères dues au lancement (chocs, vibrations, acoustiques), des rayonnements ionisants (vieillesse prématurés des matériaux), des décharges électrostatiques... Les effets de ces conditions d'environnement extrêmes doivent être systématiquement étudiées par simulation numérique et par des essais en laboratoire.

L'ensemble de ces contraintes fait que les coûts de développement et de fabrication de ces antennes sont très élevés par rapport aux antennes terrestres. L'utilisation d'outils de modélisation adaptés et performants permet d'optimiser les composants de l'antenne et de réduire au maximum le recours à la réalisation de maquette radioélectrique. Ces outils de conception interviennent à toutes les étapes de développement, depuis l'étude de faisabilité jusqu'à l'analyse des performances en orbite durant la vie du satellite.

2. LES BESOINS EN OUTILS DE MODÉLISATION

Le cycle de développement d'une antenne spatiale étant de plus en plus court (de 1 à 4 ans selon la complexité), le besoin en moyens de simulation électromagnétique est très fort d'un point de vue industriel. Aussi, ce besoin est différent selon le niveau d'avancement dans le cycle de développement. Dans les phases initiales du projet, lors de la réponse à un appel d'offre ou de l'étude de faisabilité, les ingénieurs ont besoins d'outils numériques de dimensionnement rapides et fiables. L'objectif est alors de trouver les meilleures solutions techniques à un

problème donné, spécifié par des performances de haut niveau. Les compromis coût/performances/risque sont introduits à ce niveau de définition. Des techniques d'optimisation efficaces sont alors très utiles. Ensuite, dans les phases de conception détaillée, on fera appel à des méthodes numériques précises, permettant de calculer les performances radioélectriques fines des antennes. La qualité des modèles numériques mis en oeuvre permettra de réduire les phases d'essai sur maquette radioélectrique, très coûteuses en argent et en temps. Cette complexité de développement implique donc l'utilisation d'outils numériques à plusieurs niveaux.

Pendant longtemps, le domaine du calcul électromagnétique appliqué à des problèmes industriels était surtout occupé par des ingénieurs ayant un lien fort avec la physique ou l'ingénierie. La résolution des équations de Maxwell était alors réalisée de manière pragmatique, en adaptant les méthodes à des classes de problèmes. Les méthodes dites asymptotiques comme les théories géométriques de la diffraction ou les méthodes d'optique physique en sont un très bon exemple. A partir d'hypothèses sur le problème à traiter, les équations de la physique sont simplifiées pour être résolues numériquement, sans forçement de preuve mathématique de leur application. L'arrivée récente d'une vision plus "mathématique" des problèmes électromagnétiques a permis d'apporter une plus grande richesse dans le domaine de la modélisation d'antennes. L'avènement des mathématiques appliquées a permis d'introduire un formalisme plus rigoureux et ainsi de développer de nouvelles approches numériques robustes et générales et d'améliorer la fiabilité des résultats obtenus.

Initialement, chacun développait pour ces besoins propres des codes de calcul adaptés à ses problèmes. Cependant, pour des raisons de coûts et de performances, l'utilisation de codes commerciaux se généralise. Pour un prix raisonnable (de l'ordre de 30.000 euros), on peut disposer d'outils de conception performants et d'une mise en oeuvre simple. Depuis quelques années, des logiciels de modélisation électromagnétique ont été commercialisés avec succès. A titre d'exemple, on peut citer HFSS (Ansoft), MicroWave Studio (CST) ou Grasp (Ticra) qui sont très répandus dans l'industrie spatiale.

Ces codes commerciaux sont largement utilisés pour les études de sources primaires (cornet, antennes imprimées), les structures guidées (circuits d'alimentation, réseau formateur de faisceau) ou les antennes à réflecteur. Ils sont basés sur des techniques numériques éprouvées et validées. Ils comportent généralement des interfaces graphiques performantes et conviviales qui rendent leur utilisation à la fois rapide et fiable, apportant un gain de temps considérable lors des phases de pré et post traitement. La compatibilité de ces outils avec d'autres logiciels de CAO (calcul électromagnétique, thermique, mécanique) permet également une intégration aisée dans un cycle de développement industriel.

Cependant, les codes commerciaux ne permettent pas de répondre à tous les besoins industriels. Il reste nécessaire de développer des codes de calcul adaptés à certains problèmes particuliers. On remarque que deux grandes classes de problèmes requièrent des développements de nouvelles méthodes numériques: les problèmes de grande dimension et les problèmes spécifiques.

2.1. Les problèmes de grande dimension

Dans cette catégorie, on retrouve les problèmes pouvant théoriquement être résolus par les méthodes de modélisation classiques (éléments finis, méthode des moments, différences finies, ...) présentes dans les codes de calcul commerciaux, mais dont les dimensions numériques sont trop importantes. A titre d'exemple, pour calculer le diagramme de rayonnement d'une antenne à 2 GHz en présence de la structure du satellite de classe moyenne par un modèle de type méthode des moments, il faut construire et résoudre un système linéaire de l'ordre de 300 000 inconnues. La taille de ce système matriciel étant proportionnelle au carré de la fréquence, les limites sont rapidement atteintes pour ce type de problème. Ces limites se trouvent naturellement repoussées au cours des années par l'augmentation des capacités de calcul des plateformes informatiques de type PC. Certains problèmes inatteignables quelques années plus tt sont maintenant accessibles par un simple changement de matériel informatique. La démocratisation des architectures parallèles est aussi un élément important. Les codes commerciaux commencent à utiliser ces technologies mais restent limités à un petit nombre de processeurs, essentiellement sur des systèmes d'exploitation Windows. Le parallélisme sur un grand nombre de processeurs est toutefois extrêmement intéressant mais nécessite de développer ses propres codes de calcul, ce qui le réserve aux grands groupes industriels et aux laboratoires de recherche.

Une solution consiste à étudier des algorithmes permettant de résoudre de grands problèmes avec une consommation de ressources informatiques moindre. Dans cette voie, de grands progrès ont été réalisés cette dernière décennie avec les méthodes multiples rapides (Fast Multipole Method) [4][5]. Cette nouvelle approche, apparue dans les années 90, a révolutionné le domaine du calcul électromagnétique en augmentant de deux à trois ordres de grandeur la taille des problèmes pouvant être résolus sans perte de précision notable. Ainsi, nous pouvons résoudre des problèmes d'implantation d'antenne sur de grandes structures avec des méthodes basées sur la résolution des équations intégrales. Ces méthodes multiples rapides sont arrivées maintenant à un niveau de maturité qui leur permet d'être intégrées dans des codes de calcul commerciaux [6][7].

Les techniques de décomposition de domaine sont également extrêmement intéressantes car elles permettent de scinder un grand problème numérique en sous problèmes plus petits, que l'on peut résoudre efficacement [8]. Chacun de ces sous problèmes peut alors être résolu avec une méthode numérique ad-hoc. De nombreux travaux de recherche ont montré que ces approches numériques peuvent apporter de réelles solutions aux problèmes industriels. Elles sont particulièrement bien adaptées à des problèmes pouvant être naturellement découpés en plusieurs domaines, comme par exemple le cas d'une antenne imprimée sur une grande structure métallique ou d'un circuit d'alimentation d'antenne multifaisceaux.

2.2. Les problèmes spécifiques

Les logiciels de calcul d'antennes disponibles dans le commerce ne permettent pas de répondre à tous les problèmes industriels rencontrés lors de la conception d'une antenne spatiale. Dans toutes activités d'ingénierie, les méthodes d'optimisation ont une grande importance car elles permettent de trouver les meilleures solutions pour un problème donné et d'effectuer les compromis performances/coût.

Pour être efficace, un algorithme d'optimisation doit être adapté au problème à traiter, c'est à dire que les variables d'optimisation et la fonction à minimiser doivent être correctement choisies. Les algorithmes d'optimisation utilisés dans les codes commerciaux sont trop généralistes et donc mal adaptés aux problèmes à résoudre tels que l'optimisation de sources primaires, de réflecteurs conformés [9] ou d'antennes réseaux. Ils ne permettent pas une optimisation efficace des paramètres du problème qui sont souvent des paramètres "systèmes" (rapport signal utile sur interférences, couverture terrestre, géométrie de réflecteur...). Le développement de méthodes spécifiques aux problèmes traités est alors un passage obligé pour atteindre les performances souhaitées. Afin d'illustrer ces propos, considérons le cas d'une antenne réseau devant un réflecteur parabolique, voire un réflecteur formé. Ce concept d'antenne est particulièrement bien adapté aux futurs systèmes de télécommunications par satellite. Le problème consiste à calculer les coefficients d'alimentation en amplitude en en phase des sources du réseau à partir, entre autres, de spécifications sur le diagramme de rayonnement de l'antenne. Etant donnée la complexité d'un tel système, il convient d'utiliser des algorithmes d'optimisation les plus efficaces possibles associés à des codes de calcul électromagnétiques adaptés à ce type de problème spécifique.

L'étude de nouveaux concepts d'antennes nécessite également de développer des modèles numériques adaptés. Les antennes à formation de faisceau par le calcul, les réseaux en réflexion ("reflect-array") [10] ou en transmission ("transmit-array"), les antennes à base de métamatériaux sont des technologies qui sont actuellement en cours d'étude pour des applications spatiales. Pour modéliser ces types d'antennes, on fait appel à plusieurs niveaux de modèles numériques. Par exemple, pour modéliser un "reflect-array", la source illuminatrice, les déphaseurs et le réseau vont être calculés chacun par des modèles différents car adaptés au problème. De ce fait, une optimisation globale est très difficile. Le développement d'un modèle électromagnétique multiéchelle serait alors extrêmement intéressant.

3. ET LE FUTUR

Dans le développement des futures antennes spatiales, les outils de modélisation électromagnétique auront une importance encore plus forte. La complexité croissante des antennes spatiales, comme les antennes multifaisceaux reconfigurables, permet difficilement de réaliser des maquettes radioélectriques représentatives afin

d'évaluer les performances de l'antenne. Les essais au sol sur des modèles réels atteignent des coûts exorbitants et ne sont pas représentatifs de toutes les configurations possibles. L'utilisation de la simulation numérique est alors inévitable pour s'assurer de l'adéquation des performances de l'antenne aux spécifications du système de télécommunication.

Afin de réduire les coûts d'étude et de développement dans un contexte économique toujours plus compétitif, tous ces outils de modélisation devront également s'intégrer dans un processus de développement plus global. Il devient de plus en plus important que ces codes de calcul électromagnétique soient interfacés directement avec d'autres outils d'ingénierie (calcul des performances systèmes, calcul mécanique et thermique, ...). Le développement d'antennes complexes comportant des composants actifs toujours plus intégrés aux parties rayonnantes, ou même des antennes à formation de faisceau par le calcul nécessitera de développer des outils numériques spécifiques, intégrant des modèles électromagnétiques, d'électronique numérique et de thermique. Ces outils permettront alors des optimisations globales des équipements de télécommunication par satellite.

En conclusion, même si les logiciels commerciaux répondent à 80 pour cent des problèmes industriels, il reste nécessaire de disposer d'outils de modélisation spécifiques et adaptés aux besoins pour répondre aux challenges de l'industrie spatiale. Sans ces outils, le développement de nouvelles antennes, toujours plus complexes, sera impossible.

4. BIBLIOGRAPHIE

- [1] CNES, "Cours de Technologie Spatiale - Techniques et Technologies des Véhicules Spatiaux", Edition Cépadués
- [2] G.Maral, M.Bousquet, "Satellite Communications Systems", John Wiley and Sons Ltd, 4th edition, 2002
- [3] T.Kitsuregawa, "Advanced Technology in Satellite Communication Antennas", Artech House, Boston, London, 1990
- [4] W.Chew, J.Jin, E.Michielsen, J.Song, "Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics", Artech House Antennas and Propagation Library, Boston, London, 2001
- [5] E.Darve, "The Fast Multipole Method: Numerical Implementation", Journal of Comput. Physics, vol.160, no 1, pp. 196-240, May 2000
- [6] FEKO website: www.feko.info
- [7] Computer Simulation Technology website: www.cst.com
- [8] N.Zerbib, "Méthode de sous-structuration et de décomposition de domaines pour la résolution des équations de Maxwell" - Thèse de doctorat INSA Toulouse 2006
- [9] B.S.Westcott, "Shaped Reflector Antenna Design", Research Studies Press LTD
- [10] C.Apert, T.Koleck, Dumon, T.Dousset, C.Renard, "ERASP a New Reflectarray Antenna for Space Applications", EuCAP 2006 - European Conference on Antennas and Propagation