Modèles asymptotiques et surfaces courbes : application au transport ferroviaire

Asymptotic models and curved surfaces : application to railway transportation

Emilie Masson¹, Pierre Combeau², Marion Berbineau³, Rodolphe Vauzelle², Lilian Aveneau² ¹ALSTOM-Transport, 33 rue des Bateliers, 93404 Saint-Ouen ²Université de Poitiers, Xlim-SIC UMR CNRS 6172, Bvd P. et M. Curie, 86962 Futuroscope-Chasseneuil ³INRETS, 20 rue Elisée Reclus, 59650 Villeneuve d'Ascq emilie.masson@inrets.fr

Résumé

De nombreux systèmes de communication sans fil sont développés pour les communications entre les trains et l'infrastructure et entre les trains dans les domaines métro et ferroviaire. Dans le but de développer ces systèmes dans les environnements particuliers que sont les tunnels, qui peuvent être rectilignes ou courbes, et de section rectangulaire ou voûtée, des modèles de propagation spécifiques doivent être développés. Dans ce papier, nous proposons de modéliser la propagation en tunnels rectilignes de section voûtée à l'aide de différents modèles asymptotiques à base de tracé et de lancer de rayons alliés à une facettisation de la section voûtée. Une méthode d'interpolation des normales est implémentée afin de minimiser l'erreur introduite par l'utilisation de la facettisation. Ces résultats sont confrontés à ceux de la littérature, afin de démontrer la validité de notre approche.

Several wireless communication systems are developed for communication needs between train and ground or between trains in the railway or mass transit domains. In order to deploy these systems in specific environments, such as tunnels, straight or curved, rectangular or arch-shaped section, specific propagation models have to be developed. In this paper, we propose a method to model the radio wave propagation in straight arch-shaped tunnels by using asymptotic methods, such as Ray Tracing and Ray Launching, combined with the tessellation of the arched section. A method of interpolation of the facets' normals is implemented in order to minimize the error made when using the tessellation. These results are compared to those found in the literature in order to validate our approach.

Introduction

Des systèmes de communication sans fil sont de plus en plus utilisés dans le domaine des transports guidés (métro, trains classiques, TGV) pour des communications entre les trains et l'infrastructure ou entre les trains. Ces systèmes répondent à des besoins de contrôle-commande ou des besoins opérationnels tels que des transmissions haut-débit pour des applications multimédia (surveillance, information voyageurs). Ils sont déployés généralement dans des environnements radioélectriques complexes tels que les tunnels. Des niveaux de champ élevés sont en général requis afin de répondre aux exigences de sûreté de fonctionnement et de qualité de service des applications. Le déploiement en tunnels est aujourd'hui traité par des campagnes de mesures intensives longues et coûteuses et doit donc être analysé spécifiquement. Le développement d'outils de simulation pour la planification radioélectrique dans ces contextes est donc pertinent, cependant les méthodes classiques telles que le lancer ou le tracé de rayons ne fonctionnem plus pour des tunnels courbes et/ou voûtés [1], [2], [3], [4], [5].

Ce papier présente les résultats obtenus pour différents modèles de propagation dans des tunnels rectilignes de section voûtée en considérant une facettisation de la voûte pour approximer la courbure. Dans la section 1, nous donnons les résultats obtenus avec une technique de tracé de rayons utilisant la méthode des images. Les limites de cette méthode dans les configurations considérées sont exposées. La section 2 détaille les résultats issus d'une technique de lancer de rayons classique utilisant les normales géométriques des facettes. Afin d'éliminer les erreurs introduites par cette méthode, nous proposons d'interpoler les normales des facettes selon une méthode inspirée des techniques de Synthèse d'Images [6]. On constate alors l'amélioration sensible des résultats. Enfin, les conclusions et les perspectives de ce travail sont données.

1. Facettisation associée à un tracé de rayons

Le tracé de rayons [7] est une méthode asymptotique qui consiste en une recherche directe des trajets géométriques suivis par l'onde. Il est possible de déterminer l'ensemble des rayons entre un émetteur et un récepteur. Cette technique est fondée sur la méthode des images qui calcule l'ensemble des images de l'émetteur par rapport aux facettes de l'environnement, pour un nombre donné de réflexions successives. Les images sont calculées par symétrie axiale par rapport à chaque facette, la normale des facettes joue donc un rôle important dans la recherche des trajets. Dans le cas d'une surface courbe, qui peut être approximée par une infinité de facettes infinitésimales, une seule source génère une infinité d'images (car on a une infinité de normales). A l'instar de ce qui est proposé dans [3], [4], [5], [8], nous avons choisi d'approximer la surface courbe en un nombre raisonnable de surfaces planes, ceci afin de limiter le temps de calcul qui en découle directement.

Tous les résultats sont donnés en termes de puissance reçue (P_r) par rapport à la puissance émise (P_t) en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur le long de l'axe longitudinal du tunnel. Les simulations ont été réalisées à 1 GHz dans un tunnel rectiligne de section voûtée, dans la configuration illustrée figure 1. L'émetteur est placé au centre de la voûte, à une hauteur de 4,5 m. Le récepteur est situé à 2 m de la paroi latérale du tunnel, à une hauteur de 1,5 m, et se déplace le long du tunnel. Les résultats obtenus en fonction du nombre de facettes sont illustrés figure 2.

Comme nous l'avons montré dans [8] par comparaison avec des mesures, il apparait que pour un nombre raisonnable de facettes la puissance reçue ne converge pas. Ceci s'explique par le fait que chaque facette supplémentaire introduit de nouveaux trajets et fait varier la puissance reçue. Une convergence au niveau de l'allure de la courbe de puissance exposée figure 2 sera atteinte pour un nombre très important de facettes de taille très petite. En effet, les nouveaux trajets introduits pour chaque nouvelle facette seront quasiment identiques aux précédents et engendreront ainsi un simple décalage sur le niveau de signal reçu. Ces nouveaux trajets forment donc des doublons du trajet réel, provoquant ainsi une mauvaise estimation de la puissance reçue. En outre, compte tenu du rapport direct et exponentiel entre le nombre de facettes et le temps de calcul du tracé de rayon, il n'est pas envisageable de le vérifier par simulations. Dans tous les cas, l'algorithme de tracé de rayons montre ici ses limites. Les résultats obtenus par *Wang & Yang* [2] illustrés figure 3 le confirment. Dans la partie suivante, nous présentons une méthode de lancer de rayons permettant de pallier ce problème.



^{8 m} Figure 1. Configuration de simulation







2. Facettisation associée à un lancer de rayons

La technique du lancer de rayons [7] consiste à lancer dans l'environnement un grand nombre de rayons à partir de l'émetteur. Ceux-ci se propagent par réflexions successives. Il s'agit alors de déterminer les rayons qui atteignent le récepteur ponctuel. A cette fin, il est nécessaire de considérer une sphère autour du récepteur, chaque rayon interceptant celle-ci est alors considéré comme contribuant à la puissance reçue. Ainsi, plusieurs rayons géométriquement proches peuvent être retenus alors qu'ils correspondent à un seul trajet au sens de l'Optique Géométrique, faussant alors l'estimation de la puissance reçue, comme pour le cas du tracé de rayon (cf. partie 1). On parle dans ce cas de rayons multiples. Garantir la convergence de la puissance reçue consiste alors à identifier ces rayons multiples pour n'en retenir qu'un pour le calcul de puissance. La difficulté et la précision de cette méthode résident donc dans le réglage de la taille de la sphère de réception et des critères d'identification des rayons multiples (IMR en anglais) [7].

L'algorithme d'IMR retenu consiste alors à évaluer successivement les critères suivant :

1. le nombre de réflexions : si le nombre de réflexions de deux rayons est identique, alors on évalue le deuxième critère,

2. la longueur du rayon : les longueurs (ou temps de propagation) des deux rayons sont comparées. Si leur différence de marche est inférieure à un seuil préalablement fixé, on évalue le dernier critère,

3. la direction de départ : les angles d'émission des deux rayons sont comparés. Si l'angle formé par ceux-ci est inférieur à un seuil prédéfini, alors les deux rayons sont considérés multiples, et on ne retient que le premier.

Si le premier critère est sans équivoque, la mise en œuvre des deux suivants nécessite des seuils dont les valeurs doivent être fixées de manière adéquate, afin de garantir une bonne convergence. Ce dernier point constitue la principale difficulté de la mise en œuvre de l'algorithme de lancer de rayons proposé.

2.1 Utilisation des normales des facettes

Dans cette partie, les résultats sont obtenus à partir de la méthode de lancer de rayons que nous avons implémentée (avec sphère de réception et IMR) associée à la prise en compte des normales des facettes dans le calcul de la direction des rayons après réflexion.

La figure 4 présente les résultats à 1 GHz en fonction du nombre de facettes utilisé. Grâce à l'algorithme d'IMR, une convergence des résultats est observée à partir d'un grand nombre de facettes (environ 120 facettes). De plus, ce résultat est très proche de celui proposé par *Wang & Yang* [2], ce qui permet de valider cette approche.



Figure 4. Résultats de simulation à 1 GHz en lancer de rayons en fonction du nombre de facettes

2.2 Interpolation des normales des facettes

La facettisation de la section voûtée du tunnel entraine une erreur sur les normales aux points de réflexion. En effet, quel que soit le point de réflexion, la normale qui lui est associée est systématiquement celle de la facette correspondante, comme illustré figure 5. Cet exemple montre que l'utilisation de la normale à la facette conduit le rayon à s'éloigner du récepteur et donc à son élimination alors qu'en réalité, la normale de la voûte au point de réflexion conduit le rayon à intercepter la sphère de réception, prouvant son existence au sens de l'Optique Géométrique. La réciproque de cet exemple conduisant à retenir des trajets réellement inexistants est aussi valable.

En conséquence, nous présentons ici une méthode permettant de minimiser ces erreurs en estimant la normale de la surface courbe (la voûte) au point de réflexion. Cette estimation consiste en une interpolation linéaire des normales des facettes basée sur l'algorithme de Phong [6], largement utilisé en Synthèse d'Images.

Le principe repose, pour chaque facette, sur le calcul de la normale de chacun des quatre sommets de la facette. La normale d'un sommet est fixée comme étant la moyenne des normales des facettes adjacentes si l'angle entre les facettes est suffisamment faible. L'interpolation de la normale N à un point de réflexion P d'une facette F est basée sur les coordonnées barycentriques de P dans le triangle $S_1S_2S_3$, comme illustré figure 6.





Figure 5. Illustration de l'erreur faite sur les normales par l'utilisation de la facettisation

Figure 6. Illustration de la méthode d'interpolation des normales

La figure 7 présente les résultats obtenus en appliquant la méthode d'interpolation pour la configuration de la figure 1. Encore une fois, une convergence des résultats vers celui de *Wang & Yang* [2] est clairement observée avec l'augmentation du nombre de facettes.

Néanmoins, l'interpolation des normales aux points de réflexion permet d'obtenir cette convergence beaucoup plus rapidement. En effet, 16 facettes suffisent à l'obtenir dans ce cas contre 120 sans interpolation.



Figure 7. Résultats de simulation à 1 GHz en lancer de rayons avec interpolation des normales en fonction du nombre de facettes

3. Conclusion

Cet article présente les résultats obtenus en utilisant différentes méthodes permettant de modéliser la propagation des ondes radioélectriques en tunnels rectilignes de section voûtée. Une facettisation de la voûte est réalisée afin d'approximer la courbure. L'influence du nombre de facettes est analysée. Les simulations sont réalisées à 1 GHz à l'aide de méthodes asymptotiques.

Dans un premier temps, le tracé de rayons est testé. Nous montrons qu'il ne permet pas d'obtenir une convergence des résultats avec un nombre raisonnable de facettes. En effet, chaque facette ajoutée engendre de nouveaux trajets ne correspondant pas obligatoirement à des trajets réels. La puissance reçue est alors mal estimée. De plus, le tracé de rayons est limité en nombre de facettes étant donné l'augmentation exponentielle du temps de calcul qui en découle.

Dans un second temps, nous proposons de pallier ce problème par l'implémentation d'une méthode de lancer de rayons associée à un algorithme d'IMR. Cette dernière donne des résultats concordant avec ceux de la littérature [2] si tant est que le nombre de facettes considéré soit suffisamment important (environ 120).

Enfin, nous proposons une méthode permettant d'obtenir une convergence identique mais beaucoup plus rapide car nécessitant beaucoup moins de facettes (environ 16). Celle-ci consiste à considérer une estimation réaliste des normales de la voûte aux points de réflexion. Cette estimation est obtenue par une interpolation linéaire des normales des sommets des facettes basée sur l'algorithme de Phong, bien connu en Synthèse d'Images.

A court terme, une des perspectives de ce travail consiste à confronter les résultats de notre méthode à ceux obtenus par une méthode exacte de type FDTD.

Références

[1] D. Didascalou. Ray-optical Wave Propagation Modelling in Arbitrarily Shaped Tunnels. Ph.D. dissertation, University of Karlsruhe, Germany, feb. 2000.

[2] T.-S. Wang and C.-F. Yang. Simulations and measurements of wave propagations in curved road tunnels for signals from GSM base stations. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 54(9):2577-2584, 2006.

[3] S.-H. Chen and S.-K. Jeng. SBR image approach for radio wave propagation in tunnels with and without traffic. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 45(3):570-578, 1996.

[4] S. Baranowski, G. Bourdier, and P. Degauque. Optimisation des règles d'ingénierie radiomodélisation de la propagation d'ondes radioélectriques en tunnels courbes. Convention d'études INRETS/USTL 1997/L1, Laboratoire de Radio propagation et Electronique, Villeneuve d'Ascq, avril 1998.

[5] R. P. Torres, L. Valle, M. Domingo, S. Loredo, and M. C. Diez. CINDOOR: An engineering tool for planning and design of wireless systems in enclosed spaces. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 41(4), 1999.

[6] A. S. Glassner. Principles of Digital Image Synthesis, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA. 1994. ISBN 1558602763.

[7] M. F. Iskander and Z. Yun. Propagation Prediction Models for Wireless Communication Systems. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 50(3) : 662-673, 2002.

[8] E. Masson, P. Combeau, M. Berbineau, R. Vauzelle. Radio Wave Propagation in Arched Cross Section Tunnels – Simulations and Measurements. Accepted for publication in the Journal of Communications for special issue on wireless communication underground and confined areas in May/June 2009.