HAL
open science

Un Modèle de Propagation Quasi 3D Déterministe et Rapide pour les Réseaux de Capteurs à Faible Portée

Taha Ahmed Mohammed Al Wajeeh, Rodolphe Vauzelle, Pierre Combeau, Ahcène Bounceur

To cite this version:

Taha Ahmed Mohammed Al Wajeeh, Rodolphe Vauzelle, Pierre Combeau, Ahcène Bounceur. Un Modèle de Propagation Quasi 3D Déterministe et Rapide pour les Réseaux de Capteurs à Faible Portée. XXèmes Journées Nationales Microondes, May 2017, Saint-Malo, France. hal-01704397

HAL Id: hal-01704397

https://hal.science/hal-01704397v1

Submitted on 8 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Un Modèle de Propagation Quasi 3D Déterministe et Rapide pour les Réseaux de Capteurs à Faible Portée

T. Alwajeeh[1], P. Combeau[1], R. Vauzelle[1], A. Bounceur[2]

[1]*Institut de recherche XLIM, UMR CNRS 7252, Bvd Marie et Pierre Curie BP 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil.*
[2]*Lab-STICC, UMR CNRS 6285-20, Avenue Victor Le Gorgeu 29238, Brest*
taha.al.wajeeh@univ-poitiers.fr

Résumé — *Ce papier propose un modèle de propagation déterministe quasi 3D et rapide pour une configuration micro-cellule, appliqué aux réseaux de capteurs sans fil pour les villes intelligentes dont les nœuds se trouvent en-dessous du niveau moyen des toits. Ce modèle rapide repose, d'un côté, sur une structure accélératrice calculée dans un plan 2D horizontal et intègre, d'un autre côté, d'autres optimisations reposant notamment sur l'exploitation de la portée des nœuds et d'un ensemble d'arbres de visibilité pré-calculés. Dans un premier temps, ce modèle est validé par confrontation à la mesure, puis les stratégies d'accélération y sont intégrées. L'ensemble de ces approches permet de réduire considérablement les temps de calcul sans perte significative de la précision.*

1. Introduction

Les smart cities, ou villes intelligentes, sont des villes connectées qui utilisent les technologies des télécommunications pour améliorer la vie des habitants. Elles proposent une variété de services publics urbains dans tous les domaines ; éducation, santé, sécurité, business, transports, agriculture, énergie, *etc*. En matière de développement de la ville intelligente, la Métropole de Lyon fait figure de pionnière. La Métropole de Lyon a été élue première smart city de France selon l'étude de m2ocity [1].

Les travaux de ce papier s'inscrivent dans le cadre du projet de recherche ANR-PERSEPTEUR [2]« PlateformE viRtuelle 3D pour la Simulation des rEseaux de caPTEURs ». PERSEPTEUR a pour objectif de construire des outils exploitant des descriptions urbaines libres, afin de permettre le déploiement, la visualisation et l'analyse des réseaux de capteurs urbains.

Dans le cadre du projet, une tâche essentielle consiste à estimer les liaisons radios entre les nœuds communicants d'une manière réaliste et rapide pour contribuer au déploiement. Les outils de conception doivent répondre à trois contraintes : la précision, la prise en compte de l'environnement de propagation et de la mobilité des nœuds, mais aussi le temps de calcul qui doit être raisonnable afin d'envisager le traitement des réseaux réalistes potentiellement constitués de milliers de nœuds.

Les modèles de propagation existants ne répondent pas suffisamment à ces contraintes. Citons deux catégories de modèles. D'une part, les modèles déterministes 3D qui permettent de prendre en compte l'environnement de propagation, garantissant ainsi une bonne précision, mais dont les temps de calcul prohibitifs excluent leur utilisation pour l'application visée, particulièrement, quand un grand nombre de nœuds est traité. D'autre part, les modèles empiriques, théoriques, ou statistiques qui semblent intéressants du point de vue de leurs temps de calcul mais qui ne permettent pas de tenir compte de l'environnent spécifique dans lequel on souhaite déployer le réseau. À cette fin, la voie de recherche dans ce papier est donc de trouver le juste équilibre qui représente un compromis satisfaisant entre ces deux solutions.

Les capteurs et les objets connectés sont liés via un protocole de communication standard. Un seul protocole ne peut pas servir toutes les applications envisagées. Il existe donc des dizaines de protocoles et technologies différentes, qui ont chacune leurs particularités en termes de consommation énergétique, portée radio, et débit de transmission. Selon les critères cités, les protocoles de communication ont été classifiés en trois grandes catégories [3]. La première catégorie est caractérisée par une courte portée, une faible consommation d'énergie, et un débit relativement faible comme le ZigBee et le WirelessHART. La deuxième catégorie est caractérisée par une longue portée, une très faible consommation d'énergie, et et un débit très faible comme Sigfox et LoRa. La troisième catégorie utilise les protocoles des réseaux cellulaires. Cette catégorie est capable de transférer des données avec un débit important sur de vastes distances. Les protocoles des réseaux cellulaires sont souvent mal adaptés à cause de la contrainte énergétique des capteurs.

Dans ce papier, nous proposons un modèle valide pour une configuration micro-cellule. Le modèle proposé respecte les contraintes citées précédemment via une implémentation efficace d'un modèle déterministe (tracé de rayons) reposant sur un calcul d'arbre de visibilité 2D présenté en Section 2, suivi d'une technique d'accélération exploitant la protée radio théorique des nœuds présenté en Section 3. Enfin, en Section 4, nous proposons une autre technique d'accélération qui consiste à pré-calculer un ensemble d'arbres de visibilité afin de construire très rapidement les trajets.

2. Modèle déterministe quasi 3D

2.a. *L'arbre de visibilité*

L'arbre de visibilité 2D est une technique purement géométrique permettant de découper l'espace en zones géométriques à partir d'une position particulière de l'émetteur, et selon des critères physiques particuliers (*i.e.* des interactions particulières : réflexion (sur une façade), diffraction (sur une arête), ou transmission (à travers un mur)[4, 5].

Le premier niveau de l'arbre contient les zones de visibilité directe de l'émetteur (*cf.* Figure 1). Le niveau suivant de l'arbre contient l'ensemble des zones engendrées par réflexion, diffraction, ou transmission à partir du niveau précédant. L'algorithme fonctionne ainsi de manière itérative jusqu'à ce que le nombre maximal d'interactions soit atteint.

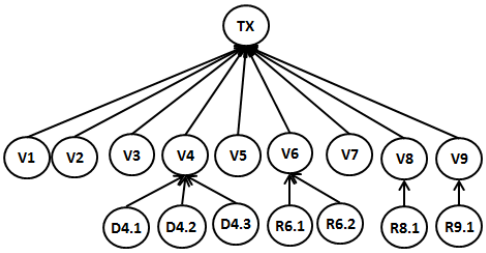

Figure 1. Exemple d'un arbre de visibilité

Il est possible à travers cet arbre de déterminer rapidement l'ensemble des trajets géométriques entre un récepteur et l'émetteur pour lequel l'arbre a été calculé. Le principe est simple : chaque nœud de l'arbre incluant le récepteur correspond à un trajet géométrique réel ayant subi une combinaison d'interactions souhaitées, il suffit donc de remonter cette branche de l'arbre jusqu'à l'émetteur.

Les trajets sont trouvés dans le plan horizontal, ils sont ensuite transformés en 3D en ajustant la hauteur des points de réflexion/diffraction conformément au principe de Fermat. Il faut également tester si les trajets modifiés se situent réellement sur l'obstacle. Finalement, le trajet réfléchi sur le sol est intégré. En revanche, le modèle résultant ne considère pas les trajets diffractés sur les toits d'où sa qualification de quasi 3D. En effet, il faut souligner que lorsque la hauteur moyenne des bâtiment est supérieure à la hauteur de l'émetteur, la plus grande partie des trajets se propage latéralement, ce qui peut justifier le fait de calculer les trajets dans le plan horizontal sans considérer les trajets diffractés par les toits[6]. Dans ce constat, le modèle proposé est adapté à une configuration micro-cellule.

Après avoir identifié l'ensemble des chemins géométriques résultants de toutes les combinaisons possibles des interactions demandées, le calcul des champs électromagnétiques se fait par le biais de la théorie de l'Optique Géométrique (OG) [7] et la Théorie Uniforme de la Diffraction (TUD)[8, 9].

2.b. *Validation du modèle*

Le modèle proposé a été comparé avec des mesures effectuées en bande étroite à une fréquence de 932 MHz sur un parcours de 5 km (correspond à 1650 points de réception équidistants) dans la ville de Paris et dans une configuration micro-cellulaire, car la hauteur de l'émetteur (21 m) est inférieure à celle des bâtiments de l'environnement.

Les résultats de simulation du modèle semblent confirmer la validité du modèle (*cf.* Figure 2) en indiquant une erreur absolue moyenne d'environ 7.5 dB, et une erreur moyenne d'environ - 0.2 dB par rapport aux mesures. La majeure partie de l'erreur vient du fait que le trafic (routier et piétonnier) et la végétation n'ont pas été considérés dans la simulation, et du fait que la scène modélisée ne comprend pas tous les détails de l'environnent de propagation. De plus, notons que le modèle présent ignore les trajets dans le plan vertical, à savoir les rayons diffractés par les toits et leurs combinaisons, ce qui peut aussi contribuer à l'erreur commise. Finalement, concernant les points mal couverts dans les bande en couleur (*cf.* Figure 2), il s'agit de récepteurs éloignés pour lesquels la puissance reçue correspond à un grande nombre de trajets dans les plans horizontal et vertical.

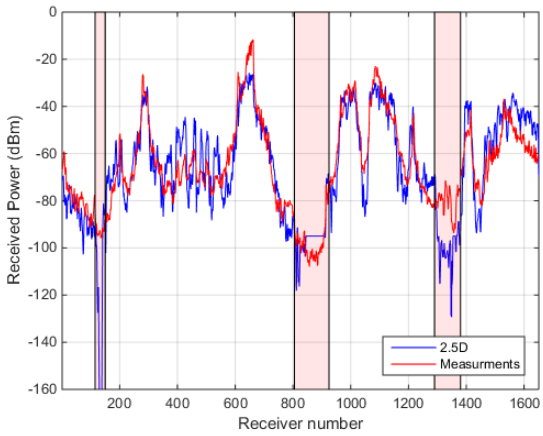

Figure 2. Comparaison simulations et mesures.

2.c. *Gain en temps*

La complexité du tracé de rayons 3D est importante car il est basé sur la méthode classique des sources-images, qui est à la fois simple à mettre en oeuvre et précise. Cependant, elle devient rapidement très lente si les nombres des murs, de réflexions et de diffractions sont importants, surtout pour un grand nombre de récepteurs. Pour réduire cette complexité sans perte des trajets significatifs, nous avons adopté l'idée de l'arbre de visibilité qui est beaucoup plus rapide même pour un ensemble de récepteurs.

Le tableau 1 met en évidence la réduction forte du temps de calcul par à rapport à un modèle tracé de rayons en 3D. Les résultats de simulation (*cf.* Figure 2 et tableau 1) sont encourageants non seulement en terme d'erreur moyenne par à rapport aux mesures, mais aussi en termes de temps de calcul. Remarque : NC signifie Non Calculable.

Nbr d'interactions (Réflexion, Diffraction)	Modèle proposé (1650 récepteurs)	Modèle 3D (un récepteur)
1R1D	1.5 s	1 m
2R1D	6.5 s	2j 3h
3R1D	20 s	NC
4R1D	55 s	NC

Tableau 1. Gain de temps

3. Exploitation des portées théoriques des nœuds

3.a. Principe

Une deuxième technique permettant de réduire les temps de calcul consiste à ne considérer que la portion de l'environnement ayant un impact significatif sur l'estimation du canal.

À cette fin, nous exploitons le fait que la portée soit limitée à quelques centaines de mètres (pour les capteurs du standard IEEE 802.15.4), et le fait que la prise en compte des trajets très peu énergétiques n'augmente pas significativement la précision. Simplement, l'idée consiste à prendre en compte dans le calcul les bâtiments/les obstacles qui se trouvent entièrement ou partiellement dans la portée radio théorique des nœuds.

3.b. Précision Vs Gain en temps

Pour évaluer l'impact de la scène limitée à la portée des nœuds, sur la précision et sur le temps de calcul, nous avons évalué, pour un ensemble de positions d'émission, l'erreur absolue moyenne en utilisant une scène limitée à une portée radio donnée. La figure 3 illustre une telle limitation d'une portée de 150 m autour de l'émetteur. L'erreur a été calculée sur une grille de récepteurs (230 récepteurs) distribués uniformément avec un pas de 5 m, autour de l'émetteur et à une distance comprise entres 75-95 m (afin de ne pas considérer les récepteurs proches de l'émetteur car ils sous-estiment l'erreur). De plus, nous avons également évalué le gain en temps de calcul correspondant. Comme le montre le tableau 2, cette optimisation consistant à ne considérer qu'une portion limitée de l'environnement de propagation, permet de réduire les temps de calcul sans perte significative de la précision. L'erreur présentée dans ce tableau correspond à l'écart entre la scène globale et celle de la portion considérée.

Impact de la scène limitée		
Portée	150 m	Toute la scène
Erreur [dB]	0.1	–
Temps [s]	7	23

Tableau 2. Gain en temps vs précison

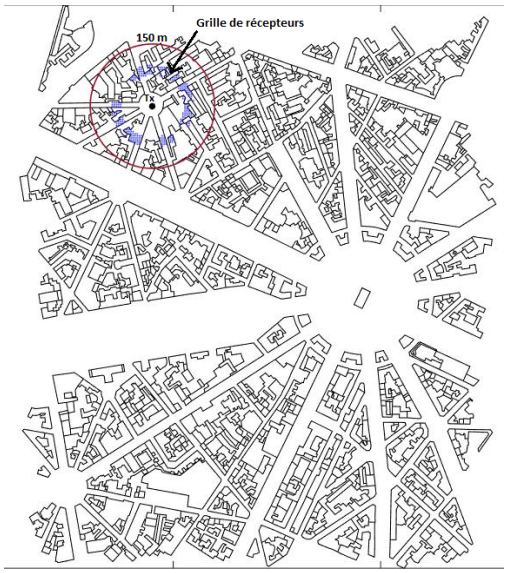

Figure 3. Scénario étudié

4. Pré-calcul de l'arbre de visibilité 2D

Comme indiqué précédemment, l'objectif est de trouver le juste équilibre entre la précision et la rapidité, tout en maîtrisant les erreurs induites par les optimisations proposées. Modéliser les nœuds mobiles de manière déterministe sous une contrainte de temps de calcul est en soi une tâche difficile due à la complexité des modèles déterministes. Dans ce sens, la dernière stratégie proposée vise également à diminuer encore les temps de calcul. Elle consiste à pré-calculer les arbres de visibilité pour les utiliser à la demande manière très rapide. Pour ce faire, nous avons stocké un ensemble d'arbres de visibilité paramétrés selon une combinaison particulière d'interactions et calculés sur une grille prédéfinie (régulière ou adaptative) d'émetteurs. Néanmoins, et dans le but de minimiser l'occupation mémoire sur le disque dur, il est indispensable de stocker les arbres sous une forme très compacte dont nous ne présentons pas ici les détails techniques afin de ne pas alourdir cet article.

Après avoir pré-calculé les arbres de visibilité selon la grille prédéfinie, le principe de construction des trajets est le suivant : pour un émetteur donné, nous utilisons l'arbre de visibilité le plus proche de cet émetteur.

Dans un premier temps, nous nous intéressons à l'impact de cette stratégie d'optimisation sur la précision. L'erreur introduite par le pré-calcul des arbres est due à l'utilisation de l'arbre approché en lieu et place de l'arbre calculé à la position exacte de cet émetteur. Le tableau 3 montre l'importance de la résolution de la grille sur l'erreur commise. On peut noter que l'erreur commise est acceptable pour une discrétisation fine. Néanmoins, l'occupation mémoire des arbres pré-calculés sur le disque dur peut devenir importante lorsque le nombre d'interactions augmente et lorsque la résolution de la grille devient fine.

Enfin, nous nous intéressons à évaluer le gain en temps de calcul apporté par cette dernière optimisation : dans ce but, nous présentons les temps de calcul en distinguant le

Pas de Grille	Erreur Absolue Moyenne
10 m	4.4 dB
5 m	3.2 dB
2 m	1.6 dB
1 m	0.8 dB

Tableau 3. l'impact du pas de la grille

temps de la recherche et la lecture de l'arbre pré-calculé, et celui mis par nos traitements spécifiques (reconstruction des trajets, calcul de champs électromagnétiques). De plus, le temps de calcul dépend du nombre d'interactions et de la portée considérés dans le calcul des arbres de stockés. Par exemple, prenons la combinaison de 4R1D et une portée de 150 m, le temps nécessaire pour la lecture d'un arbre pré-calculé est de l'ordre de la dizaine de millisecondes par arbre, et le temps nécessaire pour les traitements est de l'ordre de quelques millisecondes par lien émetteur-récepteur.

Remarque : les temps de calcul présentés dans ce papier ont été obtenus sur un PC DELL Precison T1700 équipé d'un processeur Intel(R) Core(TM) i7-4770 CPU @ 3.4 GHz

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé un modèle déterministe quasi 3D basé sur le calcul d'un arbre de visibilité 2D horizontal. Nous avons validé le modèle avec des mesures effectuées dans une configuration microcellulaire. Les résultats de simulation sont très encourageants en terme d'erreur moyenne et aussi en termes de temps de calcul. Ensuite, nous avons intégré dans ce modèle d'autres stratégies d'accélération. Dans un premier temps, en limitant la scène à la portée théorique pour réduire la complexité de l'environnement de propagation. Dans un deuxième temps, en utilisant la stratégie du pré-calcul. L'ensemble de ces approches nous a permis d'avoir un modèle assez précis et un temps de calcul très faible. Finalement, ce modèle sera intégré dans le simulateur de réseaux de capteurs CupCarbon développé dans le cadre du projet PERSEPTEUR[10].

6. Remerciements

Nous tenons à remercier l'agence nationale de la recherche qui finance le projet de recherche PERSEPTEUR.

Références

[1] "Ville de demain 2014," m2ocity, Novembre 2013.

[2] "Site internet du projet persepteur," http ://www.agence-nationale-recherche.fr / ?Projet=ANR-14-CE24-0017/.

[3] "A technical overview of lora and lorawan," LoRa Alliance, Novembre 2015.

[4] P. Combeau, L. Aveneau, R. Vauzelle, and Y. Pousset, "Efficient 2-d ray-tracing method for narrow and wideband channel characterisation in microcellular configurations," *IEEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 153, pp. 502–509, 2006.

[5] L. Aveneau, P. Combeau, R. Vauzelle, and M. Meriaux, "Efficient computation of radio coverage zone using a spatial partitionment approach," *IEEE 58th Vehicular Technology Conference*, vol. 1, pp. 65–68, 2003.

[6] K. Rizk, R. Valenzuela, S. Fortune, D. Chizhik, and F. Gardiol, "Lateral, full-3d and vertical plane propagation in microcells and small cells," *IEEE 48th Vehicular Technology Conference*, May 1998.

[7] D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius, and J. A. G. Malherbe, *Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction*. Artech House, 1990.

[8] R. Kouyoumjian and P. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, pp. 1448–1461, November 1974.

[9] R. Luebbers, "A heuristic utd slope diffraction coefficient for rough lossy wedges," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, pp. 206–211, February 1989.

[10] "Site internet de cupcarbon," http ://www.cupcarbon.com/.