Une méthode hybride pour modéliser la communication par satellites en environnements urbains et suburbains

Xiang LI¹, Rodolphe VAUZELLE¹, Yannis POUSSET¹, François MARTINEZ², and Pierre COMBEAU¹

¹Université de Poitiers, laboratoire XLIM-SIC, UMR CNRS 6172.

Bât. SP2MI - Téléport 2 - Boulevard Marie et Pierre Curie - BP 30179 - 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex ²Ergospace - 3, Chemin du Pigeonnier de la Cépière - 31100 Toulouse

xiang.li@sic.univ-poitiers.fr

Résumé

Cet article présente une méthode ayant pour objectif d'estimer efficacement des cartographies de niveau de puissance reçue par un récepteur mobile en environnement urbain pour lequel l'émetteur est un satellite. La propagation des ondes radioélectriques entre un satellite et un récepteur terrestre met en évidence des phénomènes de masquage et de multitrajets. Le signal reçu présente ainsi des évanouissements lents et rapides. Afin de modéliser les fluctuations des signaux satellites reçus en tenant compte des spécificités du site de réception, cet article propose une nouvelle approche combinant des aspects statistiques et déterministes de la propagation. Pour les variations lentes, elle s'appuie sur un calcul efficace du niveau moyen local reposant sur la notion de distance de cohérence. Pour les fluctuations rapides, l'approche est basée sur la détermination du paramètre principal de la loi de Nakagami-m en fonction de la caractéristique majeure des multitrajets à savoir les interactions électromagnétiques (réflexions, diffractions). Le logiciel Ergospace basé sur un tracé de rayons sert de support à cette étude pour des environnements urbains et suburbains.

1. Introduction

Une communication entre un satellite et un récepteur en milieu urbain peut subir des effets de masquages dus à la présence d'éléments bloquant la visibilité directe et des effets multitrajets dus aux différents types d'interactions électromagnétiques (réflexions et diffractions principalement). Ainsi, en un point de réception, deux types d'évanouissement peuvent exister : évanouissements lents (*Slow-fading*) dus aux masquages et évanouissements rapides (*Fast-fading*) dus aux multitrajets [1]. Nous allons étudier dans la suite de cet article ces deux types d'évanouissements séparément, puis les combiner.

Le phénomène d'évanouissement lent se traduit par l'évolution de la moyenne locale du signal. Lors d'un calcul classique de zone de couverture d'un émetteur, le niveau moyen de réception est estimé sur une grille régulière de récepteurs virtuels [2] indépendamment de l'évolution possible de la densité d'urbanisation dans l'environnement étudié. En outre, l'utilisation de cette méthode nécessite la définition du pas spatial de la grille. Quant aux évanouissements rapides, plusieurs lois statistiques sont utilisées pour le modéliser, parmi lesquelles celle de Nakagami-m [3] dont son paramètre m a été particulièrement étudié ces dernières années [4]. Ce modèle donne un bon accord avec des données mesurées. Toutefois, la difficulté réside dans l'estimation de m. Des travaux ont été réalisés dans cet objectif qui seront présentés dans la section 2.

Les solutions proposées dans cet article s'appuie globalement sur un apprentissage de la propagation dans le milieu étudié. Pour les évanouissements lents, l'objectif consiste à ne plus être contraint par une grille régulière car cela peut d'une part engendrer des erreurs et d'autre part ne pas être efficace en terme de temps de calcul. Le principe s'appuie sur la notion de distance de cohérence du canal de propagation. Pour les évanouissements rapides, nous introduisons une approche semi-déterministe établissant un lien direct entre le phénomène de multitrajets et le paramètre *m*. Les résultats sont présentés et commentés dans la section 3 en s'appuyant sur des simulations produites par le logiciel *Ergospace*, logiciel de simulation validé expérimentalement en collaboration avec le CNES [5].

2. Principe de la méthode proposée

2.1. Évanouissements lents

Contrairement à un calcul classique de zone de couverture dans lequel un pas spatial constant est utilisé pour définir la position des récepteurs virtuels, nous proposons de s'affranchir de cette limitation. Le principe consiste à étudier les fluctuations lentes du signal reçu après traitement par moyenne glissante [6]. Compte tenu des phénomènes de masquage, il apparaît alors évidemment deux types de comportement : niveau de réception élevé dans les zones en visibilité (Line Of Sight : LOS) et niveau plus faible en non-visibilité (No Line Of Sight : NLOS). Toutefois, nous avons mis en évidence que quelle que soit la zone en LOS, le niveau est presque constant alors que dans les zones en NLOS, il n'en est rien. En LOS, cela s'explique aisément car le trajet direct prédomine largement et son atténuation ne varie quasiment pas compte tenu des faibles variations de distance satellite-terre à l'échelle de l'environnement étudié. Par contre, en NLOS, la hauteur des bâtiments, la largeur des rues, des cours intérieures impactent fortement le niveau de réception. Cela nous conduit ainsi à déterminer des positions de récepteurs fictifs irrégulières en fonction des zones. L'autocorrélation spatiale des signaux est au cœur de cette étude.

2.2. Évanouissements rapides

Les évanouissements rapides d'un signal peuvent se modéliser par la loi statistique de Nakagami-*m*. Il est alors nécessaire de connaître *m*. Son estimation s'appuie souvent sur des signaux mesurés, rendant difficile son utilisation à de nouveaux environnements. Par exemple, Rubio *et al* [7] ont réalisé des campagnes de mesure et estimé l'évolution de *m* pour plusieurs zones situées dans la ville de Valence. Ce travail montre que, dans un environnement de propagation et pour un parcours donné, il peut exister différents types d'évanouissement.

Dans cet article, nous faisons l'hypothèse que m est directement lié aux interactions «onde-milieu de propagation» qui sont à l'orgine des multitrajets et donc des évanouissements rapides. Décrivons maintenant le principe : grâce au logiciel Ergospace, basé sur le concept de rayons, il est possible de connaître par exemple le nombre de réflexions et diffractions associées à chaque trajet reçu. Nous allons étiqueter chaque trajet par une combinaison d'interactions (CI) notée xRyD, avec x et y le nombre de réflexions et de diffractions, respectivement. Ainsi, en un point d'un parcours suivi par un récepteur mobile, nous pourrons utiliser une expression telle que "0R0D+1R0D+2R1D" pour dire que 3 types de trajet y ont été reçus. Si nous associons une valeur numérique à chacune de ces combinaisons d'interactions, l'expression devient une somme (notée Σ_{CI}) décrivant la nature des multitrajets. Pour choisir ces valeurs numériques, il faut qu'elles donnent une somme unique à chaque expression et que le trajet le plus énergétique ait une valeur associée plus grande. Une sélection des valeurs pour les CI se trouve dans Tableau 1.

| CI | OROD | 1ROD | 2R0D | 1R1D | 2R1D | OR1D |
|--------|------|------|------|------|------|------|
| Valeur | 32 | 16 | 8 | 4 | 2 | 1 |

Tableau 1. Valeurs associées aux combinaisons d'interactions

Ainsi, l'expression "0R0D+1R0D+2R1D" se calcule comme $\Sigma_{CI} = 32 + 16 + 2 = 50$ et ce uniquement pour cette expression. Nous pouvons ensuite tracer l'évolution de Σ_{CI} avec celle du signal reçu comme dans Figure 1





Il se trouve que l'évolution de Σ_{CI} donnent des indica-

tions sur les différents types d'évanouissements rapides : si on utilise les points où la valeur de Σ_{CI} change pour segmenter le signal reçu et estimer, dans chaque intervalle segmenté, le paramètre *m* de Nakagami, notre hypothèse revient à dire que les valeurs de *m* seront voisines dans les intervalles ayant une même valeur de Σ_{CI} . Comme Σ_{CI} représente la nature des multitrajets, il sera aussi lié au type d'obstacles rencontrés par les ondes dans le milieu de propagation. Figure 2 montre un exemple schématique où le parcours est segmenté en 4 intervalles de 3 couleurs différentes, chacune correspondant à un *m* différent. C'est-àdire que le premier et le dernier intervalle ont un même *m*, correspondant à une configuration locale de bâtiments similaire.



Figure 2. Résultat schématique montrant 3 comportements d'évanouissements rapides traduits par 3 valeurs de *m*

3. Mise en œuvre et résulats

L'étude s'appuie sur la simulation de signaux issus de satellites géostationnaires fonctionnant à la fréquence de 1500MHz et définis par un angle R.A.A.N (*Right Ascension of the Ascending Node*) variant de 30° à 70° par pas de 10°, puis de 300° à 360° par pas de 10°. Les récepteurs se déplacent sur des parcours en milieux urbain dense et suburbain (4 environnements ont été étudiés dont Toulouse centre et résidentiel présentés dans Figure 4 et Figure 3, respectivement) en suivant les parcours matérialisé par des lignes grises à 10 km/h avec un pas d'échantillonnage à 0,382 λ qui permet la décorrélation de deux échantillons consécutifs [6]. Les simulations sont réalisées par le logiciel *Ergospace* sur un PC à Intel Celeron 2,8G avec 2G de RAM, le logiciel prend en moyenne 0,08 seconde pour calculer un lien satellite–récepteur.



Figure 3. Environnement 3D de Toulouse centre et parcours simulé d'une longueur de 1,8 km



Figure 4. Environnement 3D de Toulouse résidentiel et parcours simulé d'une longueur de 1.1 km

Tableau 2 montre les caractéristiques des scènes utilisées pour notre étude :

| Scène | Taille (m) | \overline{h} (m) | \overline{d} (m) |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Toulouse Centre | 300×300 | 18 | 4 |
| Toulouse Résidentiel | 390×270 | 14 | 5 |
| Toulouse Capitole | 1280×640 | 16 | 3 |
| Toulouse Arènes | 1750×1200 | 23 | 12 |

Tableau 2. Caractéristiques des environnements de Toulouse \overline{h} : hauteur moyenne des bâtiments \overline{d} : largeur moyenne des rues

3.1. Évanouissements lents

La mise en œuvre de la méthode proposée s'appuie sur le logiciel *Ergospace*. Nous avons simulé des déplacements du récepteur dans différentes zones d'un environnement ensuite, nous avons utilisé le principe de la distance de cohérence [8]. Cela consiste à calculer l'autocorrélation spatiale des signaux obtenus et d'en déduire la distance de cohérence D_c . Celle-ci est définie par la distance entre les deux points d'intersection les plus proches entre la fonction d'autocorrelation et une ligne horizontale à 50% en coordonée. Comme il a été expliqué dans la section 2.1, il semble raisonnable d'étudier séparément les configurations LOS et NLOS. Nous avons segmenté les signaux reçus lors des 12 tests réalisés en intervalles et les avons regroupés selon un critère de visibilité.

Nous observons qu'en LOS, D_c augmente d'autant plus que la longueur de l'intervalle est grande, c'est-à-dire que la distance de cohérence n'est jamais atteinte (d'où la forme triangulaire de l'autocorrélation dont la base est la longueur total de l'intervalle comme le montre Figure 5). Cela s'explique par le fait que la distance satellite-terre ne varie quasiment pas pour des récepteurs situés dans l'environnement. Ainsi, il suffit d'employer le modèle en espace libre pour calculer l'atténuation du signal pour tous les récepteurs fictifs en LOS et cette simplification va réduire de façon significative le temps de calcul.

Cependant, en NLOS, D_c est très petite et fluctue de façon notable selon les configurations de l'environnement (Figure 6).

Le bilan des valeur de D_c en NLOS peut donc s'exprimer par sa fonction de répartition comme le montre Figure 7, avec la distance de cohérence médiane à 2,49 mètres. Tableau 3 donne quelques exemples de valeur médiane pour différentes zones à Toulouse. Il se trouve qu'une valeur de 2,5 mètres peut être utilisée comme pas



Figure 5. Distance de cohérence pour des zones en LOS



Figure 6. Distance de cohérence pour des zones en NLOS

spatial lors du calcul de niveau moyen de réception dans les zones en NLOS pour ces types de zone dans Toulouse. Cela permet ainsi de réduire le temps de calcul d'un facteur égal à 6,25 car le pas spatial était d'un mètre dans la méthode basée sur une grille régulière [2].

| Environnement | Valeur médiane de D_c (m) | | | |
|----------------------|-----------------------------|--|--|--|
| Toulouse centre | 2,49 | | | |
| Toulouse résidentiel | 2,60 | | | |
| Toulouse capitole | 2,40 | | | |
| Toulouse arènes | 2,65 | | | |

Tableau 3. D_c médiane pour les différentes zones de Toulouse

3.2. Évanouissements rapides

Avec les mêmes données utilisés dans le paragraphe 3.1, c'est-à-dire 12 simulations réalisées dans chacun des deux types d'environnement (urbain dense et suburbain), nous allons étudier ici les évanouissements rapides du signal. Comme il est expliqué dans la section 2.2, on segmente le signal reçu à l'aide de l'évolution de Σ_{CI} . Dans chaque intervalle, on applique le technique de la fenêtre glissante [6] qui consiste à soustraire la moyenne locale du signal afin que le phénomène d'évanouissement lent soit enlevé.

Ensuite, nous faisons l'estimation de *m* par la méthode



Figure 7. Fonction de répartition de la distance de cohérence en NLOS dans Toulouse centre

de Greenwood-Durand [9] dans les intervalles et regroupons, pour tous les tests, les intervalles du signal ayant la même Σ_{CI} . Sur la base de cette étude paramétrique, Tableau 4 montre statistiquement les caractéristiques de *m* associées à chaque Σ_{CI} . Nous lisons de ce tableau que

| Toulouse centre | | | | | Toulouse résidentiel | | | | |
|-------------------|----------------|-------------------|----------------|---|----------------------|----------------|-------------------|----------------|--|
| NLOS | | LOS | | 1 | NLOS | | LOS | | |
| $\Sigma_{\rm CI}$ | \overline{m} | $\Sigma_{\rm CI}$ | \overline{m} | 1 | $\Sigma_{\rm CI}$ | \overline{m} | $\Sigma_{\rm CI}$ | \overline{m} | |
| 4 | 0.54 | 54 | 0.75 | | 7 | 0.67 | 39 | 0.81 | |
| 7 | 0.62 | 55 | 0.76 | | 15 | 0.64 | 55 | 0.80 | |
| 15 | 0.64 | 62 | 0.71 | | 23 | 0.80 | 63 | 0.78 | |
| 31 | 0.60 | 63 | 0.73 | | 31 | 0.73 | | | |

| | | | | 1 | | | | | |
|-------------------|----------------|-------------------|----------------|---|-------------------|----------------|-------------------|----------------|--|
| Toulouse capitole | | | | | Toulouse arènes | | | | |
| NLOS | | LOS | | | NLOS | | LOS | | |
| $\Sigma_{\rm CI}$ | \overline{m} | $\Sigma_{\rm CI}$ | \overline{m} | | $\Sigma_{\rm CI}$ | \overline{m} | $\Sigma_{\rm CI}$ | \overline{m} | |
| 7 | 0.66 | 39 | 0.89 | | 6 | 0.68 | 38 | 1.11 | |
| 15 | 0.65 | 55 | 0.79 | | 7 | 0.74 | 39 | 0.77 | |
| 23 | 0.67 | 63 | 0.72 | | 15 | 0.61 | 54 | 0.80 | |
| 31 | 0.70 | | | | 23 | 0.67 | 55 | 0.82 | |
| | | | | | 31 | 0.64 | 63 | 0.79 | |

Tableau 4. Caractéristiques de m en fonction de Σ_{CI} en LOS et NLOS pour différents environnements à Toulouse

les valeurs de Σ_{CI} trouvées par scène ne sont pas toujours identiques, même si un grand nombre de positions d'émetteur a été regroupé. En fait, toutes les valeurs de 1 à 63 peuvent être présentes, mais les intervalles ne sont pris en compte que lorsqu'ils sont suffisamment grands pour que l'estimation de *m* ait un sens statistique.

Par exemple, pour l'environnement Toulouse centre, pour Σ_{CI} égale à 7, on obtient le paramètre *m* caractérisé par une valeur moyenne (\overline{m}) égale à 0,62. Il apparaît ainsi que non seulement l'hypothèse du début est vérifiée mais nous observons aussi, par type d'environnement, deux comportements différents des évanouissements rapides pour NLOS et LOS. De façon globale, il est montré que *m* en NLOS est voisin de 0,6 alors qu'en LOS, *m* est proche de 0,74 pour le centre de Toulouse, contre 0,71 et 0,80 pour la zone résidentielle. Quant aux «capitole» (urbain dense) et «arènes» (suburbain), ces valeurs sont respectivement 0,67 (NLOS), 0,8 (LOS) et 0,67 (NLOS), 0,86 (LOS). Ces résultats indiquent qu'il y a cohérence des résultats en fonction du type d'environnement (urbain dense, suburbain). Une base de données peut donc être créée dans laquelle les valeurs de *m* sont stockées en fonction du type d'environnements. Ces valeurs seront ensuite directement choisies pour un nouvel environnement qui ressemble à l'existant pour simuler les évanouissements rapides.

4. Conclusion

Cet article montre une méthode hybride déterministe/statistique pour étudier le comportement du signal lors de communications satellites en environnements urbains et suburbains. Les tests sont réalisés à l'aide du logiciel Ergospace en considérant des satellites géostationnaires. Le principe consiste à calculer le niveau moyen de réception en tenant compte de l'environnement de propagation pour les évanouissements lents et à établir un lien entre le paramètre m et la nature des multitrajets, plus précisément les interactions «onde-milieu de propagation» pour les évanouissements rapides. La connaissance de ces deux phénomènes étant importante pour l'évaluation des performances d'un système de communication, les résultats de cet article contribuent à différentes applications telles que déterminer les services disponibles ou la précision de localisation en fonction des propriétés du lien radio.

Bibliographie

- [1] B. R. Elbert, *The Satellite Communication Applications Handbook*, 2nd ed. Artech House, Inc., 2004.
- [2] Ergospace Technical Manual, 12th ed., August 2007.
- [3] M. Nakagami, "The *m*-distribution. A general formula of intensity distribution of rapid fading." in *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, W. Hoffman, Ed. Pergamon, Oxford., 1960, pp. 3–36.
- [4] Q. Zhang, "A note on the estimation of nakagami-m fading parameter," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 6, no. 6, pp. 237–238, 2002.
- [5] M. Jeannot, M. Boschetti, B. Godefroy, S. Leroy, and F. Martinez, "Study of GNSS reception in mountainous area and benefits of surface correlation," in *European Navigation Conference - Global Satellite Navigation System (GNSS)*, Munich, Germany, July 2005.
- [6] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd., 2000.
- [7] L. Rubio, J. Reig, and N. Cardona, "Evaluation of Nakagami fading behaviour based on measurements in urban scenarios," *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*, vol. 61, pp. 135–138, Feburary 2007.
- [8] R. Delahaye, P. Combeau, Y. Pousset, A.-M. Poussard, and R. Vauzelle, "D'une modélisation déterministe du canal de transmission à une simulation efficace de la qualité des liens radios pour les réseaux ad hoc," in *15èmes Journées Nationales Microondes (JNM), Toulouse*, May 2007.
- [9] J. A. Greenwood and D. Durand, "Aids for fitting the gamma distribution by maximum-likelihood," *Technometrics*, vol. 2, pp. 55–65, 1960.