Simulation et caractérisation du canal de propagation avec prise en compte du couplage entre antennes

Simulation and characterization of the propagation channel with took into account of the coupling between antennas

C. Pereira*, F. Le Pennec**, Y. Pousset*, R. Vauzelle*

*XLIM-SIC, UMR CNRS 6172, Bd Marie et Pierre Curie, BP30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France, {pereira}, {pousset}, {<u>vauzelle}@sic.univ-poitiers.fr</u>
**Télécom Bretagne, Dpt MO, Technopôle Brest Iroise, CS 83818, 29238 Brest Cedex, France {carlos.pereira}, {francois.lepennec}@telecom-bretagne.eu

Résumé :

La simulation déterministe de la propagation des ondes électromagnétiques par tracé de rayon permet de prédire efficacement le comportement du canal radioélectrique. Cependant, ces méthodes sont limitées à la modélisation de phénomènes électromagnétiques en champ lointain et ne permettent pas, dans un contexte MIMO (Multiple Input Multiple Output), de modéliser le phénomène de couplage entre antennes produit en champ proche. Pour pallier ce problème, une étude portant sur la modélisation rigoureuse du couplage et son intégration dans la modélisation du canal de propagation a été réalisée. L'impact de ce phénomène est analysé en prenant comme métrique de référence les paramètres caractéristiques du canal MIMO tels que la corrélation entre les différents sous-liens radio et la capacité MIMO.

Abstract:

The deterministic simulation of the electromagnetic waves propagation by a ray-tracing allows predicting accurately the behavior of the propagation channel. However, these methods are limited to the modeling of electromagnetic phenomenon produced in far field and are not able, in a MIMO (Multiple Input Multiple Output) context, to take into account the coupling between antennas which appears in near field. In order to overcome this drawback, a study which focuses on the rigorous modeling of mutual coupling between antennas and its integration on the channel modeling has been realized. The impact of this phenomenon is analyzed by considering the correlation between different radio-links and the MIMO capacity.

Mots clés :

Canal de propagation, Tracé de rayon, Modélisation, Caractérisation, Couplage entre antennes

Key words:

Propagation Channel, Ray tracing, Modeling, Characterization, Mutual Coupling between antennas

1. Introduction

La technologie MIMO est une solution de plus en plus utilisée dans les systèmes de transmission sans fil. En effet, elle permet de dépasser les limites des transmissions classiques (SISO) imposées par le canal de propagation. Le gain offert par cette technologie s'exprime en termes de débit ou de robustesse face aux erreurs de transmission [1][2]. Pour prédire ses performances dans des conditions réalistes de propagation, la voie de la simulation est la plus pertinente. Dans ce contexte, les méthodes asymptotiques sont particulièrement bien adaptées pour modéliser le phénomène de multi-trajet. Cependant, bien qu'elles modélisent avec précision les phénomènes électromagnétiques en champ lointain, ceux produit en champ proche ne peuvent être pris en compte. C'est le cas du

couplage entre antennes qui apparait lorsque plusieurs antennes sont placées à proximité les unes des autres.

L'étude de ce phénomène a fait l'objet de plusieurs études montrant son impact sur les paramètres caractéristiques du canal MIMO tels que la corrélation ou la capacité [3][4]. Toutefois, dans ces études, le canal considéré est généralement un canal statistique. Dans cet article, une étude originale est proposée en associant à un simulateur déterministe du canal radioélectrique une modélisation du couplage entre antennes basée sur un formalisme de paramètre de répartition.

La caractérisation du canal MIMO avec et sans prise en compte du couplage ente antennes permettra d'évaluer son influence sur les divers paramètres considérés. Cette caractérisation est pratiquée dans un environnement de type indoor et l'analyse des résultats est réalisée au travers des matrices canal, des corrélations et de la capacité.

Afin d'expliquer la démarche adoptée ainsi que les résultats obtenus, l'article se décompose comme suit : la section 2 est dédiée à la modélisation du couplage entre antennes et à son intégration dans les résultats issus du simulateur de canal radioélectrique. Ce dernier est présenté en section 3 et la configuration de simulation choisie est détaillée en section 4. Les résultats sont commentés et analysés en section 5. Enfin, une conclusion générale et les perspectives à donner à ce travail sont notifiées en section 6.

2. Modélisation du couplage entre antennes

2.1. Modélisation circuit

La modélisation du phénomène de couplage entre antennes sur laquelle s'appuie cette étude résulte de précédents travaux menés au sein du département Micro-ondes de Télécom Bretagne [5][6][7]. Elle considère les antennes comme des circuits à plusieurs accès (multi-pôles) caractérisés par des matrices de répartition (matrice S). La figure 1 schématise cette modélisation pour deux cas de figure. Le premier (cf. figure 1(a)) considère une antenne parfaitement isolée des autres antennes et de son environnement tandis que le second (cf. figure 1(b)) considère deux antennes couplées.



Figure 1(a) : antenne isolée

Figure 1(b) : antennes couplées

Figure 1 : modèles circuit d'antennes

Ces circuits possèdent deux types de port. Le premier permet l'accès au(x) générateur(s) grâce aux ondes réduites incidentes et réfléchies. Le second connecte l'(es)antenne(s) à l'environnement par les composantes complexes des champs électromagnétiques (en champ lointain) normalisées pour une polarisation et une direction particulière. Pour ces deux cas de figure, le quadripôle (antenne isolée) et l'octopôle (système à deux antennes couplées) sont décrits par les matrices suivantes :

antenne isolée	ant	antennes couplées			
	\ cc	rc	y43	ρ44/	
	rc	СС	ρ33	y34	
$(ri \rho 22)$	S21c	S22c	СС	rc	
(S11i ri)	/S11c	S12c	rc	<i>cc</i> \	

L'indice *i* est employé pour décrire des grandeurs obtenues en configuration isolée et l'indice *c* pour une configuration couplée. Les paramètres Skk sont les coefficients de réflexion en entrée tandis que les paramètres Skl sont les coefficients de transmission entre antennes. Les paramètres ρkk et yklsont similaires aux précédents, ils traduisent la réflexion et le couplage vers l'environnement d'une onde électromagnétique provenant de ce même environnement. Toutefois, l'amplitude de cette onde étant très faible, chaque ρkk et ykl sera considéré comme nul. Le paramètre ri est le coefficient de rayonnement de l'antenne isolée, il décrit comment un champ électromagnétique b_{2e} sera transmis vers l'environnement à partir d'une onde réduite incidente a_1 . De la même manière le paramètre rctraduit le rayonnement de l'antenne, mais dans un contexte MIMO. Il s'agit donc du coefficient de rayonnement de l'antenne modifié par le couplage. Enfin cc est le coefficient de couplage en rayonnement, il relie le champ électromagnétique induit puis émis par l'antenne couplée.

Dans cette étude, les antennes considérées sont des éléments passifs. De plus les antennes couplées utilisées sont parfaitement identiques. Par conséquent, les matrices caractéristiques de ces circuits sont symétriques.

L'expression des coefficients ri, rc et cc a été établie dans [5][6][7] et se compose de la manière suivante :

$$ri = \sqrt{(1 - |S11i|^2) * \operatorname{Gi} * \lambda/(4\pi)}$$
$$rc = \frac{\sqrt{(1 - |S11c|^2 - |S21c|^2) * \operatorname{Gc} * \lambda/(4\pi)}}{\max(|\operatorname{Ai}(\phi, \theta)| * |1 + \operatorname{cr} * e^{j * k * d12 * \cos(\theta) \sin(\phi)}|)}$$

$$cc = rc * cr$$

Avec *Gi* et *Gc* respectivement les gains intrinsèques de l'antenne isolée et couplée. λ et *k* sont respectivement la longueur et le nombre d'onde. $|Ai(\phi, \theta)|$ désigne le diagramme de rayonnement en champ normalisé et d12 la distance entre antennes. Enfin *cr* est le coefficient de couplage relatif, il s'agit d'un coefficient complexe qui traduit la relation linéaire entre les diagrammes de rayonnement isolés et couplés [6][7]. Tous ces coefficients de rayonnement tiennent compte des paramètres internes et externes des antennes qui peuvent être obtenus par des méthodes de simulations rigoureuses ou par le biais de mesures électromagnétiques.

Ces coefficients de rayonnement ont été validés [5] et leur évolution, en fonction de la distance entre antenne, est montrée en figure 2.



Figure 2(a) : coefficient de rayonnement modifié par Figure 2(b) : coefficient de couplage en rayonnement le couplage

Figure 2 : évolution des coefficients de rayonnement

La figure 2(a) confronte l'évolution du coefficient rc comparativement à sa version isolée. L'amplitude de rc est supérieure à ri lorsque la distance entre antennes est inférieure à $0,3\lambda$. La situation s'inverse au-delà de cette distance et alterne tous les $\lambda/4$ pour finalement converger vers ri lorsque la distance entre antennes augmente. A l'image de l'évolution de cc, cette convergence met en évidence l'affaiblissement du couplage avec la distance de séparation des antennes. L'oscillation de rc montre que le couplage peut agir en faveur du rayonnement ou au contraire diminuer son intensité et laissant ainsi présager une variation des paramètres caractéristiques du canal MIMO [8].

2.2. Combinaison couplage/canal

Pour évaluer l'impact du couplage sur les paramètres caractéristiques du canal MIMO la modélisation circuit présentée en figure 3 est adoptée. Ce schéma emploie à l'émission comme à la réception des multi-pôles représentant les antennes couplées et sont décrites par les matrices S présentées en section 2.1. Les composants *hkl* représentent les liens radio d'un canal MIMO 2*2.



Figure 3 : schéma circuit d'une transmission MIMO

La mise en cascade de ces composants permet d'écrire simplement la relation suivante :

$$Hc = Mcr * H * Mce$$

Où *H* est la matrice canal directement issue du simulateur canal, Mce et Mcr sont respectivement les matrices de couplage à l'émission et à la réception. La matrice résultante Hc est finalement la matrice canal avec prise en compte du couplage entre antennes. Pour une comparaison cohérente des paramètres caractéristiques issus de *H* et Hc, les matrices de couplage sont normalisées par le coefficient de rayonnement isolé ri. En effet, comme montré en figure 2, les coefficients rc tendent vers ri lorsque l'espacement entre antennes augmente tandis que les coefficients cc s'annulent. Ainsi, la matrice de couplage (Mcr ou Mce) tend vers la matrice identité. Cette normalisation sera appliquée pour le reste de cette étude. De plus, en considérant des antennes identiques à l'émission et à la réception, la relation précédente peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} h11c & h12c \\ h21c & h22c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{rc}{ri} & \frac{cc}{ri} \\ \frac{cc}{ri} & \frac{cc}{ri} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} h11 & h12 \\ h21 & h22 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \frac{rc}{ri} & \frac{cc}{ri} \\ \frac{cc}{ri} & \frac{rc}{ri} \end{pmatrix}$$

Le calcul des liens radio est pratiqué grâce à un simulateur de propagation d'ondes électromagnétique conçu au sein de du laboratoire XLIM-SIC.

3. Modélisation et caractérisation du canal MIMO

3.1. Le simulateur de canal radioélectrique

Le simulateur employé [9] permet une prédiction déterministe du comportement du canal radioélectrique en associant à une technique optimisée de tracé de rayons 3D l'Optique Géométrique et la Théorie Uniforme de la Diffraction. Comme le montre le synoptique de la figure 4, ce logiciel prend en considération différentes informations comme la description géométrique et électrique de l'environnement, le nombre maximum d'interactions électromagnétiques, le positionnement des antennes et leur diagramme de rayonnement. Après calcul, différents résultats comme les réponses impulsionnelles et les angles d'arrivés et de départ de chaque trajet sont fournis.



Figure 4 : synoptique du simulateur de propagation d'ondes électromagnétiques

C'est précisément de ces données que découle la caractérisation du canal MIMO. Pour les déterminer, un second logiciel également développé au sein du laboratoire XLIM-SIC et en partenariat avec le département Micro-ondes de Télécom Bretagne [10] est utilisé. L'association de ces deux logiciels appliquée à un ensemble de liens radio conduit au calcul et à la visualisation des paramètres caractéristiques. Ces derniers concernent, dans ce contexte d'étude, les matrices de canal MIMO, la capacité ergodique et les corrélations entre les différents sous-liens radio. Ces deux derniers paramètres, se basent sur la matrice canal bande étroite (H_{BE}) où chaque élément résulte de la contribution de chaque trajet calculé entre un émetteur et un récepteur.

3.2. Corrélation

Les différentes corrélations sont déterminées par la relation suivante :

$$\varrho = \frac{\operatorname{cov}(X, Y)}{\sqrt{\operatorname{var}(X) * \operatorname{var}(Y)}}$$

Avec X et Y les éléments de H_{BE} , cov(.,.) et var(.) sont respectivement les opérateurs de covariance et variance.

3.3. Capacité

La capacité est un paramètre important pour l'évaluation des performances des canaux MIMO. En effet, il permet de connaître le débit maximal par unité fréquentielle (bit/s/Hz). Pour une puissance répartie uniformément à l'émission et un même nombre d'émetteurs et de récepteurs, cette capacité est définie par l'équation suivante :

$$C = log2(det\left(In + \frac{S}{n}(HH^{H})\right))$$

Où *S* est le rapport signal à bruit, *n* est le nombre d'antennes et In est une matrice identité de dimension n * n.

4. Contexte de simulation

Le simulateur de canal est employé dans un environnement de type indoor (cf. figure 5) dans lequel une confrontation simulation/mesure a été réalisée [11]. Deux configurations de simulation sont mises en place, la première considère des antennes en visibilité directe (LOS) et la deuxième masque cette visibilité par un mur (NLOS). Dans les deux cas de figure, les distances entre émetteurs et récepteurs sont approximativement égales à 8m.



Figure 5 : environnement de propagation

Comme indiqué en figure 5 les émetteurs et récepteurs sont positionnés dans des zones d'évolution de dimension de $1m^2$ afin de respecter des contraintes de stationnarité. Dans chacune des zones, les antennes sont placées de manière aléatoire à une hauteur fixe de 1,5m et leur distance évolue de $0,1\lambda$ à 1λ par pas de $0,1\lambda$. Par ailleurs, les matrices de couplages sont déterminées pour des distances de séparation identiques afin de correspondre au scénario de propagation.

Le simulateur de canal considère des éléments rayonnant comme des antennes dipôle filaire demionde adaptées et autorise un nombre maximum d'interactions de deux réflexions, une diffraction et cinq transmissions par trajet [11]. Afin d'attribuer une valeur statistique aux résultats les simulations canal sont réitérées cent fois. Les paramètres caractéristiques présentés dans cet article seront finalement des paramètres moyens. Enfin la fréquence de travail est fixée à 5,2 GHz ($\lambda \simeq 6$ cm).

5. Résultats

L'analyse des résultats est réalisée au travers des matrices canal, des corrélations entre ses différents liens radio et de la capacité canal.

5.1. Matrices canal

En premier lieu, les matrices canal sont représentées pour trois espacements afin d'illustrer l'évolution de l'impact du couplage LOS et en NLOS. Ainsi, en figure 6, cette matrice est affichée pour $0,1\lambda$, $0,3\lambda$ et 1λ . Les valeurs en amplitudes des trajets sont ici normalisées par le trajet prépondérant sans considération du couplage.

La première lecture des figures 6 (a, c, e) (cas LOS) montre clairement que les éléments des matrices canal sont composées d'un trajet direct et de quelques trajets secondaires. En revanche, le cas NLOS (cf. figure 6(b, d, f)) montre que les matrices de canal sont composées uniquement de trajets qui ont interagis avec l'environnement (réflexions, diffractions, réfractions).

Dans le cas LOS, la comparaison entre H et Hc montre que le trajet direct est celui qui est le plus impacté par le couplage. Cet impact se traduit par une atténuation (cf. figure 6(a)) du trajet direct ou son amplification (cf. figure 6(b)). Dans le cas NLOS, ce sont à nouveau les trajets les plus prépondérants qui sont impactés. Par ailleurs, cet impact n'est pas homogène. En effet, au sein d'une même matrice canal (cf. figure 6(b)), le couplage peut agir de manière positive et négative sur l'amplitude des trajets introduisant un déséquilibre de la matrice canal et laissant ainsi présager une modification des corrélations entre les sous canaux. L'effet du couplage est donc relatif aux liaisons MIMO, dépendant notamment des contributions des paramètres rc et cc. D'autres part, la comparaison entre les figures 6(a) et 6(b) ou 6(c) et 6(d) montre que cet impact s'applique différemment selon les cas LOS et NLOS. L'impact du couplage varie donc en fonction des conditions de propagation et plus précisément des valeurs d'amplitudes et de phases attribuées aux différents trajets.



Figure 6 : évolution de la matrice canal en fonction de la distance entre antenne et comparativement au cas avec et sans prise en compte du couplage entre antennes

Enfin, à l'image des coefficients rc et cc qui ont manifesté en section 2 une convergence vers leur valeur isolée, les matrices Hc tendent vers H lorsque la distance de séparation des antennes augmente (cf. figure 6(e) et 6(f)).

5.2. Corrélations entre les sous-liens radio

Pour appuyer les observations précédentes, la figure 7 présente les corrélations entre les différents sous liens radio en fonction de la distance entre antennes et pour les deux configurations de propagation. Dans tous ces cas, toutes les combinaisons de corrélations sont affichées.

La lecture de ces figures montre tout d'abord l'évolution décroissante des corrélations issues de *H* en fonction de la distance entre antennes. Comme le montre la corrélation entre h11/h12 de la figure 7(a) ou la corrélation entre h12/h22 de la figure 7(b), le couplage montre encore une fois sa nature à prépondérance positive ou négative sur les caractéristiques du canal MIMO. De manière plus générale, l'évolution des corrélations est fortement modifiée lorsque le couplage entre antennes est pris en compte dans les résultats et montre une baisse du niveau moyen des corrélations. Cette baisse est particulièrement visible pour une distance entre antennes comprise entre $0,1\lambda$ et $0,3\lambda$ conformément à la figure 2(a).





Figure 7 : corrélation avec et sans prise en compte du couplage entre antennes

5.3. Capacité du canal

La modification des corrélations en présence de couplage entraîne celle de la capacité. Comme le montre la figure 8, la capacité du canal issue de Hc se distingue de celle issue de H par une évolution oscillante à l'image de l'évolution de rc (cf. figure 2(a)). Cet impact est le plus prépondérant pour une distance entre antennes comprise entre 0,1 λ et 0,3 λ offrant ainsi un gain pouvant aller jusqu'à 2 Bit/s/Hz (figure 8(b)) qui tend à disparaître lorsque cette distance augmente.



Figure 8 : capacité avec et sans prise en compte du couplage entre antennes

6. Conclusion

La prise en compte du phénomène de couplage est primordiale dans l'estimation des performances des systèmes de transmission MIMO. Dans un contexte de simulation déterministe du canal de propagation, les méthodes asymptotiques ne suffisent plus à déterminer l'ensemble des phénomènes physiques et nécessitent l'appui de méthodes rigoureuses. Dans cet article, l'approche proposée se base sur une combinaison matricielle de coefficients de rayonnement des antennes et des éléments de

la matrice canal. L'analyse de cette dernière avec et sans prise en compte du couplage permet de visualiser l'impact du couplage sur la caractérisation du canal MIMO.

Les résultats issus de cette étude comparative montrent, dans le cas des matrices canal, une influence non négligeable du couplage notamment sur les trajets prépondérants. Cet impact se révèle parfois favorable à l'amplitude des trajets et d'autres fois pénalisant. Implicitement, ces modifications entraînent à leur tour une modification des valeurs de corrélation. Dans les deux configurations de propagation testées (LOS et NLOS) une baisse du niveau moyen des corrélations a été constatée. Par ailleurs, la valeur de la capacité du canal montre une oscillation comparativement au cas sans prise en compte du couplage. Bien que ce dernier agisse de manière différente selon les conditions de propagation, il ressort une amélioration notable des performances pour une distance entre antennes inférieure à $0,3\lambda$. De façon plus générale, lorsque l'espacement entre antennes augmente, l'intensité du couplage diminue et perd de son influence.

Les antennes utilisées tout au long de ce travail étaient des antennes dipôles demi-onde émettant sur une seule composante de polarisation. Ainsi à l'avenir, l'une des perspectives de ce travail serait d'employer des antennes plus complexes et émettant des ondes électromagnétiques polarisées elliptiquement ou circulairement.

7. Bibliographie

[1] G. J. Foschini and M. J. Gans. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communications*, 6(3):311, March 1998.

[2] I. E. Telatar. Capacity of multi-antenna gaussian channels. *European Trans. On Telecomm.*, 10(6) :585–595, November 1999.

[3] P. N. Fletcher, M. Dean, and A. R. Nix. Mutual coupling in multielement array antennas and its influence on mimo channel capacity. *Electronics Letters*, vol. 39, no. 4, pp. 342-344, 2003.

[4] B. Clerckx, D. Vanhoenacker-Janvier, C. Oestges, and L. Vandendorpe. Mutual coupling effects on the channel capacity and the space-time processing of mimo communication systems, *IEEE International Conference on Communications*, vol. 4, pp. 2638-2642, 2003.

[5] Y. Huang. *Contribution à L´ Etude des Plates-Formes Radio-Numeriques : Cosimulation dans le Contexte MIMO WLAN*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, Septembre 2006.

[6] A. Bikiny et Y. Huang et F. Le Pennec. Méthode semi-analytique de modélisation des couplages inter-antennes pour imulations systèmes. *Journées Nationales Micro-Ondes*, Mai 2007.

[7] C.Pereira. Etude avancée des canaux de transmission radio en contexte MIMO : environnements complexes et couplage inter-antennes très large bande. PhD thesis, Université de Poitiers, Décembre 2008

[8] T. Svantesson and A. Ranheim. Mutual coupling effects on the capacity of multielement antenna systems. *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, vol. 4, pp. 2485-2488, 2001.

[9] F. Mora and L. Aveneau. Optimised scanning of a visibility graph data structure for efficient ray-tracing. In *ECWT2005*, Paris, Octobre 2005.

[10] Y. Chartois, Y. Pousset, and R. Vauzelle. A SISO, and MIMO, radio channel characterization with a 3D, ray tracing propagation model in urban environment. *ECPS*, Mars 2005.

[11] F. Escarieu. *Etude de la propagation dans les milieux indoor (intérieur des bâtiments) autour de 2 GHz,*. PhD thesis, Université de Poitiers, Décembre 2002.