



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1
UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

Sur la propagation des ondes électromagnétiques et son exploitation par des systèmes de communication sans fil

On the propagation of electromagnetic waves and its exploitation by wireless communication systems

Ghais El Zein

*Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes - IETR UMR CNRS 6164
INSA, 20 Av. des Buttes de Coësmes, CS 70839, 35708 Rennes Cedex 7, France
ghais.el-zein@insa-rennes.fr*

Mots-clefs : Communications sans fil ; haut débit ; canal de propagation ; trajets multiples ; techniques de diversité
Keywords: Wireless communications; high bit rate; propagation channel; multipath; diversity techniques

Résumé

Les nouveaux systèmes radio mobiles permettent d'intégrer de multiples services tels que le multimédia et l'accès radio large bande. Ces systèmes doivent répondre à des exigences fortes en termes de débit, de performances et de coût, dans un contexte général où la ressource spectrale est de plus en plus rare.

Le but de cette conférence est de mettre en évidence les principales caractéristiques du canal de propagation dans le cadre imposé par ces nouvelles problématiques, pour ensuite chercher à en tirer parti notamment par des techniques de diversité. Dans un premier temps, un bref aperçu des technologies de communication sans fil sera dressé et quelques nouvelles approches seront présentées. Ensuite, les différentes méthodes utilisées au sein de l'IETR pour modéliser et caractériser le canal de propagation des ondes radioélectriques seront abordées. Enfin, des résultats de mesures et de simulations seront présentés pour différents types d'environnement de propagation.

Introduction

Au cours des dernières décennies, le monde des télécommunications a connu un développement spectaculaire, grâce au grand succès des systèmes de communication mobiles et au large déploiement de l'Internet. Le passage aux nouvelles générations de ces systèmes permet d'intégrer de multiples services tels que le multimédia et l'accès radio large bande. Ces nouveaux systèmes doivent donc répondre à des exigences fortes en termes de débit, de performances et de coût, dans un contexte général où la ressource spectrale est de plus en plus rare.

Cet article met l'accent sur les principales caractéristiques du canal de propagation dans le cadre imposé par ces nouvelles problématiques, pour ensuite chercher à en tirer parti notamment par des techniques de diversité. Dans un premier temps, un bref aperçu des technologies de communication sans fil sera dressé et quelques nouvelles approches seront présentées, telles que les systèmes multi-antennes (MIMO pour *Multiple-Input Multiple-Output*), l'ultra large bande (UWB pour *Ultra-Wideband*), le retournement temporel (TR pour *Time Reversal*) ou les systèmes en bande millimétrique (MMW pour *Millimeter-Wave*). Ensuite, les différentes méthodes utilisées au sein de l'IETR pour caractériser et modéliser ces canaux de propagation seront abordées. Des résultats de mesures et de simulations seront présentés pour différents types d'environnement de propagation. Enfin, l'analyse de ces résultats permet de discuter des possibilités d'intégration de ces nouvelles techniques de transmission sans fil dans les futurs systèmes de communication.

1. Nouveaux systèmes de communication sans fil

Après le grand succès des premiers réseaux cellulaires numériques (2G) et le large déploiement de l'Internet, le multimédia pénètre désormais le marché de masse. L'accès sans fil est devenu une fonction essentielle des réseaux de communications modernes à travers le monde. Cet accès radio est rendu possible avec l'arrivée des systèmes mobiles de

3G. De même, les réseaux locaux sans fil (WLAN) assurent cette connectivité dans les bâtiments pour les ordinateurs et téléphones portables. Aujourd'hui, afin de repousser encore davantage les limites de ces systèmes en termes de débit, de qualité de service (QoS) et d'efficacité spectrale, des efforts sont fournis pour améliorer leur conception. En fait, la tendance à l'augmentation des débits de données continuera pour atteindre quelques centaines de Mbit/s pour une mobilité modérée, et quelques Gbit/s en stationnaire [1] (Fig. 1).

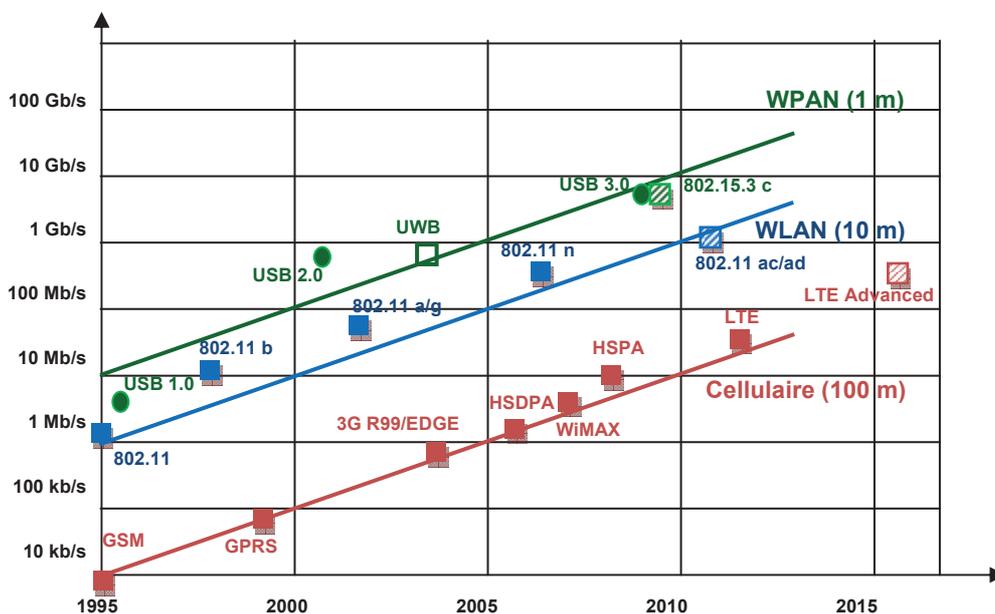


Fig. 1 Evolution des systèmes de communications sans fil

Pour répondre à ces spécifications, de nouvelles approches sont envisagées, telles que les systèmes multi-antennes (MIMO), l'ultra large bande (UWB), le retournement temporel (TR) ou les systèmes en bande millimétrique (MMW).

1.1. Les systèmes multi-antennes

Les systèmes de communication MIMO exploitent la dimension spatiale du canal de propagation, en utilisant plusieurs antennes à l'émission et à la réception. Ces systèmes tirent parti de la présence des trajets multiples entre l'émetteur et le récepteur, créant ainsi des canaux de transmission indépendants. Dans le cas idéal, la capacité du canal croît linéairement avec le nombre minimal d'antennes émettrices et réceptrices [2]. La théorie de l'information indique que deux mécanismes fondamentaux sont impliqués dans le processus du transfert de l'information. D'abord, la diversité est obtenue par la réception et la combinaison de multiples copies décorrélatées de la même information transmise. Ensuite, le multiplexage est obtenu par la réception de plusieurs symboles d'information indépendants. L'amélioration de la qualité et/ou du débit des données s'appuie sur une connaissance fine des phénomènes de propagation. Une telle connaissance permet de choisir le schéma de codage et de modulation le plus approprié pour un environnement donné. De même, les réseaux d'antennes d'émission et de réception doivent être soigneusement conçus pour maximiser le rang du canal ; c'est à dire le nombre de modes propres disponibles pour la communication. Dans ce cas, des mesures de corrélation et de dispersion des paramètres spatio-temporels du canal jouent un rôle central [3].

1.2. L'ultra large bande

La technologie UWB consiste à émettre des signaux s'étalant sur une très large bande de fréquences, typiquement de l'ordre de 500 MHz à plusieurs GHz. D'abord utilisée dans le domaine de la localisation radar, l'UWB est envisagée aujourd'hui comme candidate potentielle pour les futurs systèmes de transmission sans fil [4]. En effet, son très large support spectral permet d'augmenter la capacité de transmission et d'améliorer la résistance au brouillage. Parallèlement, l'UWB présente un fort pouvoir de résolution temporelle, qui peut être exploité pour le traitement efficace des trajets multiples, mais également pour résoudre les problèmes de localisation. De même, la faible densité spectrale de puissance des émissions UWB augmente la discrétion et la sécurité des communications et diminue le brouillage envers les autres utilisateurs du spectre. Enfin, la complexité des transmetteurs UWB peut être réduite par rapport aux architectures traditionnelles. Ces caractéristiques permettent de proposer des systèmes de communication à très haut débit, jusqu'à plusieurs centaines de Mbit/s. Dans ce contexte, la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans la propagation d'un signal UWB, semble nécessaire pour la modélisation du canal de propagation associé à un environnement spécifique [5].

1.3. Le retournement temporel

Le retournement temporel (TR) a été initialement démontré en acoustique [6]: une impulsion ultrasonore brève émise d'un point source se propage dans un milieu inconnu ; une partie de cette onde est enregistrée par un ensemble de capteurs, numérisée, retournée temporellement, et renvoyée dans le milieu de propagation. L'onde reconverge sur sa source en y reformant une impulsion brève. Ce procédé tire parti des trajets multiples présents dans le canal. Appliquée aux communications UWB, cette technique s'avère prometteuse car elle permet d'atteindre une focalisation considérable de la puissance reçue dans les domaines spatial et temporel, simplifiant ainsi le traitement du signal en réception [7], [8]. Cette propriété d'hyper-focalisation conduit également à imaginer une communication réalisée dans une configuration MIMO-MU (*Multi-User*) [9]. En utilisant un réseau d'antennes large bande fonctionnant en mode « retournement temporel », on peut transmettre simultanément différents messages, à travers un milieu fortement diffuseur, vers différents utilisateurs. Il s'agit d'une technique qui, non seulement compense les réverbérations du milieu et assure une transmission sécurisée de l'information mais qui, plus encore, exploite la diversité spatiale en réception pour augmenter le débit.

1.4. Les systèmes en bande millimétrique

L'une des solutions les plus prometteuses pour atteindre le gigabit sans fil est d'utiliser les ondes millimétriques (MMW). En particulier, la large bande autour de 60 GHz est adaptée aux communications sans fil à très haut débit et courte portée. Cet intérêt est dû également aux fortes pertes de puissance en espace libre, ou qui peuvent être causées par la présence d'obstacles (murs), ce qui permet de réutiliser plus souvent les mêmes fréquences. De même, ces fréquences élevées conduisent à utiliser des antennes et composants RF de petites tailles. Des groupes (IEEE 802.15.3c, ECMA et VHT) ont été formés afin de normaliser les futurs systèmes WPAN qui opèrent dans la bande des 60 GHz [10]. Toutefois, ces bandes de fréquence sont particulièrement affectées par certains paramètres, tels que le type et l'emplacement des antennes, l'effet de l'activité humaine ou du mobilier [11].

2. Caractérisation et modélisation du canal de propagation

La propagation des ondes électromagnétiques en radio mobile est caractérisée par la présence de trajets multiples en raison de différents phénomènes tels que la réflexion, la réfraction, la diffraction et la diffusion (Fig. 2). L'étude de ces phénomènes de propagation apparaît comme une étape importante lors de l'élaboration d'un système sans fil.

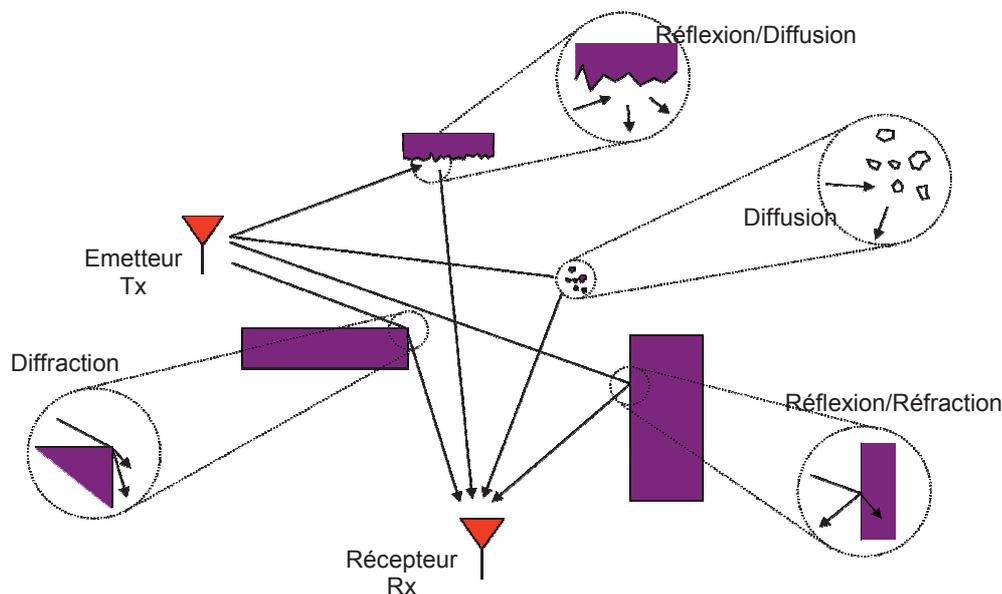


Fig. 2 Propagation des ondes par trajets multiples

Dans ce cadre, diverses métriques, telles que l'atténuation avec la distance, la fonction de transfert du canal, ou sa réponse impulsionnelle, peuvent être considérées. Pour les systèmes à large bande, l'analyse est généralement réalisée dans les domaines temporel et fréquentiel [12]. Cela permet de mesurer certains paramètres du canal, tels que la bande de cohérence, le temps de cohérence, l'étalement des retards et la dispersion Doppler. De même, l'analyse dans le domaine spatial permet d'évaluer la dispersion des directions de départ et d'arrivée des ondes ainsi que la distance de cohérence du canal. Par conséquent, une description précise des propriétés spatiales et temporelles du canal est nécessaire pour la conception de systèmes à large bande/multi-antennes, ainsi que pour le choix de la topologie du réseau [3]. Dans ce contexte, la caractérisation et la modélisation spatio-temporelle du canal apparaissent essentielles.

3. Résultats de mesures et de simulations

Pour concevoir, simuler et réaliser ces nouveaux systèmes de communications sans fil, il est nécessaire d'avoir une connaissance la plus précise possible sur la propagation des ondes radioélectriques à travers les canaux considérés. Ainsi, plusieurs sondeurs originaux de canaux large bande ont été conçus et réalisés au sein de l'IETR (MIMO [13], UWB/TR [7] et 60 GHz [14]). Des résultats de mesures et de simulations seront présentés pour différents types d'environnement de propagation (urbain, à l'intérieur des bâtiments). De même, de nouvelles techniques de transmissions sont proposées et leurs performances sont analysées et testées. L'analyse de ces résultats permet de discuter des possibilités d'intégration de ces nouvelles techniques de transmission sans fil dans les futurs systèmes de communication.

Conclusion

Les nouveaux systèmes de communications feront appel à de nouvelles techniques de transmission, qui peuvent éventuellement être combinées entre elles. Dans cet article, les principales caractéristiques du canal de propagation sont analysées dans le cadre imposé par les nouvelles techniques de communications sans fil, pour ensuite chercher à en tirer parti notamment par des techniques de diversité. Ces différentes techniques participent pleinement au traitement de la congestion spectrale et à l'avènement de l'Ecoradio.

Références bibliographiques

- 1- G. P. Fettweis, "A 5G Wireless Communications Vision", *Microwave Journal*, December 14, 2012.
- 2- G. J. Foschini, and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *IEEE Wireless Personal Communications*, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, Mar. 1998.
- 3- P. Guguen, G. El Zein, *Les techniques multi-antennes pour les réseaux sans fil*. Edition Hermes-Science : Lavoisier, Paris, 2004, 238 pages.
- 4- D. Porcino, and W. Hirt, "Ultra-wideband radio technology: potential and challenges ahead", *IEEE Commun. Mag.*, pp. 66-74, July 2003.
- 5- P. Pagani, F. Tchoffo Talom, P. Pajusco, B. Uguen, *Ultra-Wideband Radio Propagation Channels: A Practical Approach*. ISTE Ltd, John Wiley & Sons Inc, 2008, 239 pages.
- 6- M. Fink, "Time reversed acoustics", *Physics Today*, 1997, 20, pp. 34-40.
- 7- A. Khaleghi, G. El Zein, I. H. Naqvi, "Demonstration of Time-Reversal in Indoor Ultra-Wideband Communication: Time Domain Measurement", *Proc. of the 4th IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems, (ISWCS '07)*, 16-19 October 2007, Trondheim, Norway, pp. 465-468.
- 8- I. H. Naqvi, G. El Zein, G. Lerosey, J. De Rosny, P. Besnier, A. Tourin, M. Fink, "Experimental Validation of Time Reversal Ultra Wide-Band Communication System for High Data Rates", *IET - Microwaves, Antennas & Propagation*, May 2010, Vol. 4, Iss. 5, pp. 643-650.
- 9- I. H. Naqvi, G. El Zein, "Time Reversal Technique for Ultra Wide-band and MIMO Communication Systems". *Advanced Trends in Wireless Communications, InTech*, 2011, Chapter 12, pp. 223-240.
- 10- G. El Zein, G. Zaharia, L. Rakotondrainibe, Y. Kokar, "Indoor Channel Characterization and Performance Analysis of a 60 GHz Near Gigabit System for WPAN Applications". *Advanced Trends in Wireless Communications, InTech*, 2011, pp. 23-46.
- 11- S. Collonge, G. Zaharia, G. El Zein, "Influence of the Human Activity on Wide-band Characteristics of the 60 GHz Indoor Radio Channel", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 3, N° 6, November, 2004, pp. 2396-2406.
- 12- P. A. Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels", *IEEE Trans. Communic*, pp. 360-393, Dec. 1963.
- 13- H. Farhat, R. Cosquer, G. El Zein, "On MIMO Channel Characterization for Future Wireless Communication Systems". *4G Mobile & Wireless Communications Technologies*. River Publishers, Aalborg, Denmark, 2008, ISBN: 978-87-92329-02-8, pp. 225-233.
- 14- S. Guillouard, G. El Zein, and J. Citerne, "Wideband propagation measurements and Doppler analysis for the 60 GHz indoor channel", *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, Anaheim - CA, USA, June 13-19, 1999, pp. 1751-1754.