



HAL
open science

Le canal de propagation Ultra Large Bande : sondage, caractérisation et modélisation

Pascal Pagani, Patrice Pajusco

► **To cite this version:**

Pascal Pagani, Patrice Pajusco. Le canal de propagation Ultra Large Bande : sondage, caractérisation et modélisation. La Revue de l'électricité et de l'électronique, 2013, 2013 (5), pp.84 - 90. hal-00934117

HAL Id: hal-00934117

<https://hal.science/hal-00934117v1>

Submitted on 1 Aug 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.

Le canal de propagation Ultra Large Bande

Sondage, caractérisation et modélisation

Pascal Pagani et Patrice Pajusco

Telecom Bretagne, Lab-STICC UMR CNRS 6285

Introduction

La technologie Ultra Large Bande (en anglais *Ultra Wide Band*, UWB) consiste à émettre des données par voie hertzienne sur une large bande de fréquences, typiquement de l'ordre de 500 MHz à plusieurs GHz [1]. Cette propriété confère à l'UWB plusieurs avantages. D'une part, le théorème de la capacité de Shannon nous indique que les systèmes à large support spectral sont capables de supporter de plus hauts débits. Ainsi, les systèmes UWB visent des débits de l'ordre de 500 Mbit/s pour les applications à courte portée, en général à l'intérieur des bâtiments. D'autre part, les signaux UWB présentent une grande résolution dans le domaine temporel, ce qui peut être exploité pour des applications de localisation et d'imagerie.

En 2002, l'organisme de régulation américain, la *Federal Communication Commission* (FCC), a défini la bande de fréquences de 3,1 GHz à 10,6 GHz pour la transmission de signaux UWB, avec une puissance isotrope rayonnée équivalente limitée à -41 dBm/MHz. En Europe, ce niveau de puissance est autorisé dans la bande de 6 GHz à 8,5 GHz. D'autres bandes de fréquences sont tolérées (3,1 GHz – 4,8 GHz et 8,5 GHz – 9 GHz) sous la condition d'implémenter des méthodes spécifiques de mitigation de la puissance rayonnée. Notons également que d'autres bandes de fréquences sont parfois dénommées UWB, en raison de la largeur du support spectral. On peut citer la bande des ondes millimétriques autour de 60 GHz utilisée pour les communications à très haut débit et courte portée, et la bande autour de 24 GHz employée pour les radars de véhicules. Toutefois, dans la suite de cet article, nous nous concentrerons sur la bande FCC définie entre 3,1 GHz et 10,6 GHz.

Afin de développer des systèmes de communication UWB performants, une connaissance précise des conditions de propagation du signal est primordiale. D'une part, l'évaluation des paramètres large bande comme l'étalement des retards permet de dimensionner la chaîne de traitement de l'information. D'autre part, l'établissement de modèles de canal permet de valider les performances de ces systèmes dans des conditions réalistes et reproductibles. Dans cet article, nous présentons les différents aspects du canal de propagation UWB. Notons que ces aspects physiques sont indépendants de la technique de communication utilisée, et restent donc valables pour tout type de modulation UWB (radio impulsionnelle, modulation multi-porteuses, etc.) Les techniques de sondage de canal adaptées à l'UWB seront d'abord présentées, on décrira ensuite les principales caractéristiques du canal de propagation. Les différents modèles qui en sont déduits seront détaillés avant de conclure.

Techniques de sondage de canal

Afin de connaître le comportement du canal de propagation en contexte UWB, il est nécessaire de réaliser des campagnes de mesures expérimentales dans les différents environnements d'usage envisagés. En raison de la grande largeur de la bande étudiée pour les systèmes UWB, le matériel

employé doit répondre à des exigences spécifiques. En particulier, les antennes utilisées doivent présenter un diagramme aussi stable que possible sur l'ensemble de la bande analysée. Dans la pratique, des antennes UWB biconiques ou monoconiques, volumiques ou éventuellement planaires, sont utilisées. Une étude détaillée de la problématique des antennes UWB est présentée dans l'ouvrage de référence [2].

L'élément clé pour la mesure du canal de propagation UWB est le sondeur, qui doit être capable d'acquérir des signaux de l'ordre du GHz, avec un taux de répétition de la mesure élevé. Nous décrivons brièvement les méthodes principales fréquentielles et temporelles. Plus de détails peuvent être trouvés dans [3] et [4].

Domaine fréquentiel

Le but du sondage de canal est d'évaluer la Réponse Impulsionnelle (RI) du canal $h(\tau, t)$ en fonction du retard τ , et éventuellement son évolution temporelle, ce qui est caractérisé par la variable t . En raison de sa facilité d'implémentation, la méthode la plus couramment utilisée consiste à mesurer la fonction duale $H(f, t)$, appelée fonction de transfert, dans le domaine fréquentiel à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel. Cet appareil émet un signal sinusoïdal pour évaluer le paramètre S_{21} du canal situé entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice. Ce signal balaie une plage de fréquences pouvant aller jusqu'à la dizaine de GHz, si bien que le signal réellement transmis est une sinusoïde à fréquence variable, ou signal « chirp » (Figure 1a). Cette méthode fournit une dynamique de puissance élevée sur de larges bandes de fréquences, c'est pourquoi elle a été mise en œuvre dans un grand nombre de campagnes expérimentales (voir [4] et ses références). Cependant, le temps d'acquisition peut s'avérer trop long pour la mesure de canaux variant dans le temps. Cette méthode est donc plus adaptée aux canaux statiques, caractérisés par une fonction de transfert invariante dans le temps $H(f)$.

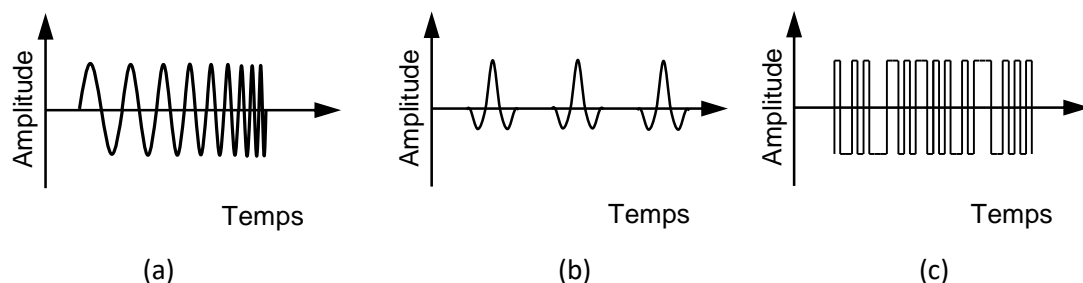


Figure 1 : Signaux utilisés pour le sondage de canal UWB : (a) méthode fréquentielle, (b) méthode temporelle par impulsion et (c) méthodes temporelles par compression d'impulsion

Domaine temporel

Afin d'accéder à la variation temporelle du canal UWB, différentes méthodes temporelles peuvent être mises en œuvre. La plus simple, dite méthode par impulsions, consiste à utiliser un générateur d'impulsions proches d'une impulsion de Dirac (Figure 1b). L'antenne réceptrice est connectée à un oscilloscope digital, qui mesure une approximation la RI du canal $h(\tau, t)$. Plus précisément, en notant $p(\tau)$ la forme temporelle de l'impulsion utilisée, la RI mesurée est donnée par :

$$(1) \quad \hat{h}(\tau, t) = h(\tau, t) \otimes p(\tau)$$

où \otimes désigne l'opérateur de convolution. Si le générateur utilisé produit des impulsions suffisamment brèves, ce type de sondage peut couvrir un large support spectral, de l'ordre de

plusieurs GHz. Par ailleurs, cette technique permet la mesure de l'évolution temporelle de la RI. Cependant, le signal reçu reste sensible au bruit, et des techniques temporelles avancées doivent être mises en œuvre afin d'améliorer la dynamique de mesure.

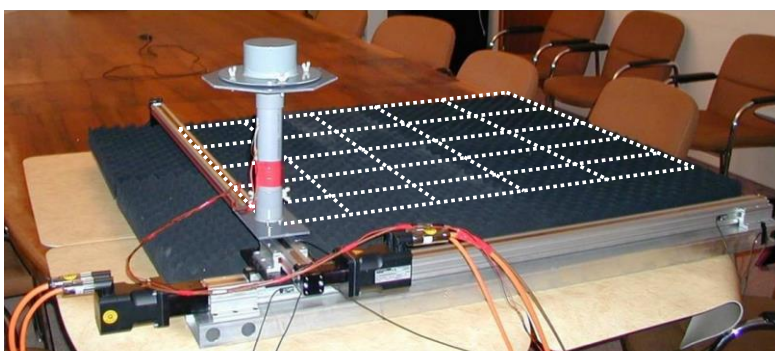
Les méthodes par compression d'impulsion utilisent un signal d'excitation $e(\tau)$ de type séquence Pseudo-Aléatoire (PA), comme représenté dans la Figure 1c. Les séquences PA présentent plusieurs particularités intéressantes pour le sondage large bande : leur enveloppe temporelle est à amplitude relativement constante, elles occupent un large support spectral, et leur fonction d'autocorrélation $R_{ee}(\tau)$ est proche d'un signal de Dirac. Les premières séquences utilisées étaient de type *Pseudo Noise* (PN). Très facilement implémentables avec quelques porte logiques, elles permettent d'atteindre des largeurs de bande très importantes à moindre coût. L'estimation en réception peut s'effectuer par une corrélation matérielle glissante. La fonction de corrélation $R_{es}(\tau)$ entre le signal d'excitation $e(\tau)$ et le signal mesuré $s(\tau)$ est une bonne approximation de la RI du canal, car elle répond à l'équation :

$$(2) \quad R_{es}(\tau) = h(\tau) \otimes R_{ee}(\tau)$$

L'apparition des générateurs arbitraires et des cartes d'acquisition rapide avec des fréquences d'échantillonnage de plusieurs dizaines de GHz ont permis d'introduire beaucoup plus de souplesse et de précision dans le traitement. Par exemple, la technique d'inversion utilise un filtre de Wiener, qui permet une estimation du canal optimisant le niveau de signal à bruit sur l'ensemble de la bande considérée.

Domaine spatial

Récemment, la recherche s'est concentrée sur l'association de la technologie UWB et des systèmes multi-capteurs. L'idée est de disposer de plusieurs antennes, soit à l'émetteur, soit au récepteur, soit aux deux extrémités du lien radio. On peut ainsi enrichir le canal classique SISO (*Single-Input Single-Output*), en formant respectivement des canaux MISO (*Multiple-Input Single Output*), SIMO (*Single-Input Multiple-Output*) ou MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) [5]. D'un point de vue système, la technologie MIMO permet d'augmenter le débit ou la robustesse de la liaison en utilisant des techniques de traitement du signal appropriées. Du point de vue de la caractérisation du canal, la disponibilité de plusieurs capteurs permet d'accéder à la direction de départ ou d'arrivée des ondes radio.



(a)



(b)

Figure 2 : Mesure UWB multi-capteurs : (a) réseau virtuel planaire, (b) antenne multi-capteurs 5 axes

La plupart des expérimentations menées pour étudier le canal de propagation à capteurs multiples ont été réalisées en utilisant un réseau de capteurs virtuel. Dans ce cas, une antenne unique est

déplacée sur une grille prédéfinie qui peut être linéaire, planaire (comme dans la Figure 2a), ou circulaire. Des mécanismes à trois axes peuvent également être mis en œuvre pour réaliser des mesures sur un réseau cubique, ce qui permet de résoudre des ambiguïtés géométriques dans la phase de post-traitement. Il faut noter que les réseaux virtuels sont bien adaptés pour les canaux statiques uniquement. L'analyse des variations temporelles du canal UWB MIMO nécessite d'utiliser un sondeur de canal « temps réel » et des antennes multiples permettant un basculement électronique rapide entre les capteurs. Une telle antenne est présentée dans la Figure 2b.

Caractérisation du canal de propagation UWB

A partir d'une base de données de mesures expérimentales, il est possible de caractériser les principaux paramètres du canal de propagation UWB. En raison des scénarios d'usage envisagés, la plupart des études du canal UWB concernent les transmissions à l'intérieur des bâtiments [3], [4], [6]. Dans la suite de cet article, nous détaillerons les caractéristiques du canal dans cet environnement *indoor*. Notons toutefois que d'autres environnements sont aujourd'hui considérés, comme les réseaux WBAN [7], les moyens de transport [8], ou l'extérieur des bâtiments [9].

Pertes par propagation

Les pertes par propagation caractérisent l'atténuation du signal reçu, $A(d)$, en fonction de la distance émetteur-récepteur d . Généralement, elles sont approchées par la relation suivante :

$$(3) \quad A(d) = A(d_0) + 10N_f \log\left(\frac{f}{f_0}\right) + 10N_d \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + S(f, d)$$

où N_f et N_d représentent respectivement les coefficients de perte par propagation en fréquence et en distance, et f_0 et d_0 sont une fréquence et une distance arbitraires. $S(f, d)$ traduit les variations lentes du canal, caractérisées par une moyenne nulle et un écart-type σ_s .

La décroissance du signal reçu avec la fréquence est un paramètre important dans le cas de signaux UWB. Le coefficient de perte par propagation en fréquence N_f dépend des caractéristiques de l'antenne. Lorsque l'on sépare l'effet de l'antenne des mesures du canal, ce coefficient se rapproche de 2, sa valeur théorique.

Le coefficient de pertes par propagation en distance N_d est égal à 2 dans le cas de l'espace libre. Pour les campagnes de sondage UWB répertoriées dans la littérature (voir [3], [4], [6] et leurs références), ce coefficient varie entre 1 et 2 en situation de visibilité (*Line-of-Sight*, LOS) en raison de l'effet de guidage procuré par les réflexions sur les murs. En situation de non visibilité (*Non Line-of-Sight*, NLOS), les valeurs typiques se situent entre 3 et 5, en raison de l'obstruction supplémentaire. Les valeurs observées s'écartent de la loi moyenne d'un écart-type σ_s de l'ordre de 1 à 2 dB en LOS et de 2 à 5 dB en NLOS.

Caractéristiques de la réponse impulsionnelle

Pour étudier les caractéristiques de la RI en s'affranchissant des fluctuations rapides du signal, on calcule un profil puissance-retard $P(\tau)$ en moyennant un ensemble de RI $h(\tau)$ mesurées localement. La Figure 3 présente un exemple de profil puissance-retard obtenu par mesure fréquentielle en configuration LOS sur la bande 3,1 GHz – 10,6 GHz. On peut observer que les trajets de propagation se regroupent en *clusters*, formés d'un trajet principal suivi d'une décroissance de trajet diffus. Cet étalement des retards se mesure à l'aide du paramètre τ_{RMS} :

$$(4) \quad \tau_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \tau^2 P(\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\tau) d\tau} - \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \tau P(\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\tau) d\tau} \right)^2}$$

Les étalements des retards typiques observés expérimentalement varient de 4 à 15 ns en configuration LOS et de 8 à 30 ns en configuration NLOS [3], [4].

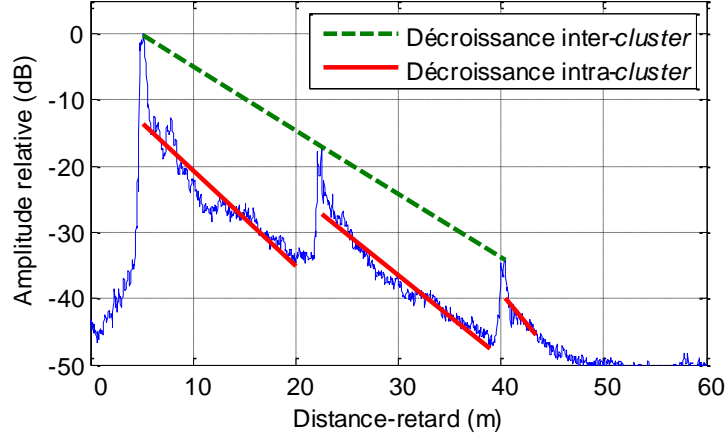


Figure 3 : Profil puissance-retard mesuré, et ajustement au modèle de Saleh et Valenzuela

L'agrégation des trajets de propagation en *clusters* est bien représentée par le formalisme de Saleh et Valenzuela [10]:

$$(5) \quad h(\tau) = \sum_{l=0}^L \sum_{k=1}^{K_l} \alpha_{k,l} \delta(\tau - T_l - \tau_{k,l})$$

où L représente le nombre de *clusters*, K_l le nombre de trajets dans le l^{e} *cluster*, et T_l l'instant d'arrivée du l^{e} *cluster*. Les paramètres $\alpha_{k,l}$ et $\tau_{k,l}$ représentent respectivement l'amplitude complexe et l'instant d'arrivée du k^{e} trajet à l'intérieur du l^{e} *cluster*. L'amplitude des trajets est modélisée par une décroissance exponentielle :

$$(6) \quad |\alpha_{k,l}|^2 = |\alpha_{1,1}|^2 \exp\left(-\frac{T_l - T_1}{\Gamma}\right) \exp\left(-\frac{\tau_{k,l}}{\gamma}\right)$$

où Γ et γ représentent respectivement les coefficients de décroissance exponentielle inter-*clusters* et intra-*clusters*. La Figure 3 montre que cette décroissance exponentielle (représentée par des droites en échelle logarithmique) est bien représentative des RI mesurées en contexte UWB. Les analyses menées sur de mesures expérimentales rapportent des coefficients de décroissance de l'ordre de 8 à 25 ns pour la décroissance inter-*clusters* Γ , et de l'ordre de 10 à 60 ns pour la décroissance intra-*cluster* γ [3].

Saleh et Valenzuela ont suggéré que les instants d'arrivée T_l et $\tau_{k,l}$ suivent des processus de Poisson avec des taux d'arrivée respectifs Λ et λ . Les études menées dans la littérature montrent que Λ varie typiquement entre 10 MHz et 100 MHz, et λ varie typiquement entre 200 MHz et 6 GHz [3]. Notons que le taux d'arrivée des trajets de propagation λ dépend directement de la capacité de résolution de la RI, et donc de la largeur de bande mesurée.

Enfin, les variations rapides du canal de propagation peuvent être caractérisées par la statistique de fluctuation d'amplitude des trajets de propagation. En caractérisation large bande, ces variations sont modélisées par une loi de Rayleigh en environnement diffus ou une loi de Rice dans le cas où un trajet direct prédomine. En caractérisation UWB, on rencontre d'autres lois paramétriques, comme les lois de Nakagami, Weibull ou plus simplement la distribution log-normale [3].

Caractérisation spatio-temporelle multi-capteurs

A partir de mesures multi-capteurs, il est possible de dépointer électroniquement le diagramme du réseau d'antennes. En estimant la puissance reçue et/ou transmise dans toutes les directions de l'espace, on accède à la dimension spatiale du canal de propagation. Moyennant l'hypothèse d'un canal discret, il est également possible d'identifier des trajets de propagation. Les techniques les plus avancées permettent d'identifier conjointement les directions de propagation en 3D au niveau de l'émetteur et du récepteur pour chaque temps de retard τ de la réponse impulsionnelle. Ces résultats s'appuient sur des techniques à haute résolution (CLEAN, MUSIC, ESPRIT, SAGE...) issues du traitement du signal. En pratique, une part non négligeable du canal ne peut-être extraite sous forme de trajet. Ce résidu, appelé composante diffuse, peut atteindre jusqu'à 30% en LOS et jusqu'à 90% de la puissance totale en NLOS.

La Figure 4a présente un exemple de liaison UWB à l'intérieur d'un bâtiment à la fréquence de 5 GHz. L'émetteur est situé au même étage à une distance de 5,6 m dans la direction de l'azimut 95° , et deux cloisons le séparent du récepteur. Cette radiophoto superpose la distribution spatiale de l'énergie reçue sur la photo panoramique prise en lieu et place de l'antenne de réception. Cette représentation facilite la compréhension des mécanismes de propagation en illustrant par exemple l'influence des ouvrants et les positions des zones de réflexion. On peut noter que la puissance maximale n'est pas reçue dans la direction de l'émetteur. Le même résultat sous forme discrète est donné sur la Figure 4b, la taille des cercles étant proportionnelle au niveau de puissance.

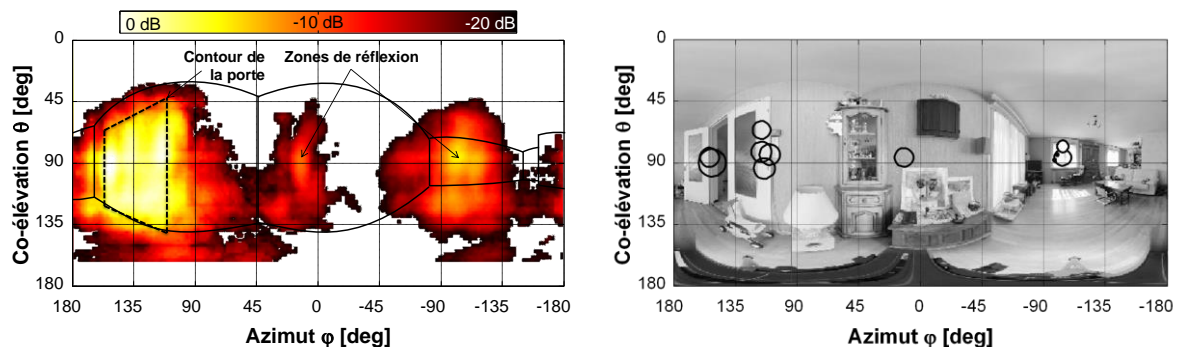


Figure 4 : Répartition spatiale de la puissance en contexte résidentiel : (a) Estimation par formation de voie (b) Estimation par technique à haute résolution

Modélisation statistique du canal de propagation UWB

Les études expérimentales de caractérisation UWB permettent de connaître les paramètres principaux du canal de propagation. Ces informations renseignent sur les contraintes dont devront s'affranchir les systèmes de communication UWB, et permettent de dimensionner ces systèmes. Par exemple, la connaissance de l'étalement des retards moyen permet de mettre au point des techniques efficaces pour limiter l'interférence inter-symboles. Afin d'évaluer les performances de ces systèmes dans un environnement réaliste, il est souhaitable de définir des modèles de canal qui reproduisent fidèlement les observations expérimentales. Ces modèles empiriques sont basés sur les statistiques des paramètres analysés et cherchent à reproduire les lois de probabilité observées.

Modélisation SISO

A partir des campagnes de mesure SISO, plusieurs modèles statistiques de canal ont été proposés dans la littérature [3]. Au niveau de la normalisation, plusieurs expérimentations ont été menées au sein du groupe de travail IEEE 802.15, afin de définir un modèle de canal UWB standard. Un premier modèle a été établi en 2003 dans le groupe IEEE 802.15.3a [11]. Il s'agit d'un modèle basé sur le formalisme de Saleh et Valenzuela, dans lequel les différents trajets de propagation se regroupent en *clusters* (voir équation (5)), comme représenté dans la Figure 5. Le modèle fournit les valeurs des paramètres Γ , γ , Λ et λ qui régissent la forme de la réponse impulsionnelle. Les trajets de propagation sont générés de manière aléatoire en suivant un processus de Poisson. Ils subissent un déphasage aléatoire de 0° ou 180° et une variation d'amplitude suivant une loi log-normale. Le modèle s'applique pour l'environnement intérieur, mais quatre configurations sont considérées suivant la distance émetteur-récepteur et la situation de visibilité : de 0 à 4 m en configurations LOS et NLOS, de 4 à 10 m en configuration NLOS et une configuration NLOS à fort étalement des retards $\tau_{\text{RMS}} > 25$ ns. Le modèle IEEE 802.15.3a reste assez théorique du point de vue des pertes par propagation : seul le cas LOS est traité, et le coefficient de perte par propagation est celui de l'espace libre, c'est-à-dire $N = 2$.

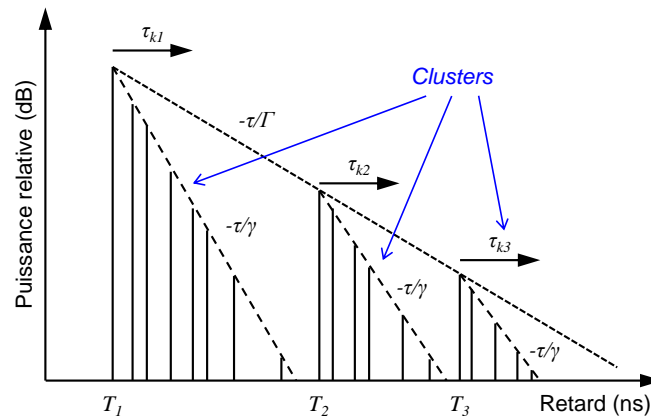


Figure 5 : Représentation du modèle de canal de Saleh et Valenzuela

En 2004, le groupe de travail IEEE 802.15.4a a modifié ce modèle en apportant plusieurs améliorations pour mieux approcher les observations expérimentales [12]. Le processus d'arrivée des trajets suit une loi mixte composée de deux lois de Poisson. La phase des trajets est distribuée uniformément entre 0° et 360° . Leur variation d'amplitude est modélisée par une loi de Nakagami dont le paramètre varie en fonction du retard. Enfin, le coefficient de décroissance intra-clusters augmente pour chaque cluster successif.

Une amélioration importante concerne également le modèle de perte par propagation, qui utilise des paramètres réalistes tirés d'expérimentations pour modéliser les pertes en distance et en fréquence. Au total, neuf jeux de paramètres ont été définis pour caractériser les environnements intérieurs de bureau, résidentiel et industriel en situations LOS et NLOS, ainsi que trois environnements extérieurs.

Modélisation MIMO

Les modèles MIMO reposent sur le concept de modélisation doublement directionnelle illustré sur la Figure 6. Ils consistent à adjoindre à chaque trajet de propagation des caractéristiques directionnelles. Dans sa forme la plus aboutie, un trajet est caractérisé par un temps de retard, une

direction moyenne (azimut θ et élévation φ) de départ et d'arrivée, une matrice 2×2 correspondant au gain dans chaque polarisation et un décalage doppler. Cette approche générique permet de découpler l'effet des antennes et du canal de propagation. Ainsi différentes antennes à l'émission et à la réception peuvent être simulées à partir d'un même modèle de canal de propagation. En contexte UWB, la seule spécificité est la largeur de bande passante plus importante qui peut induire des variations de gain des trajets et/ou des diagrammes d'antennes en fonction de la fréquence.

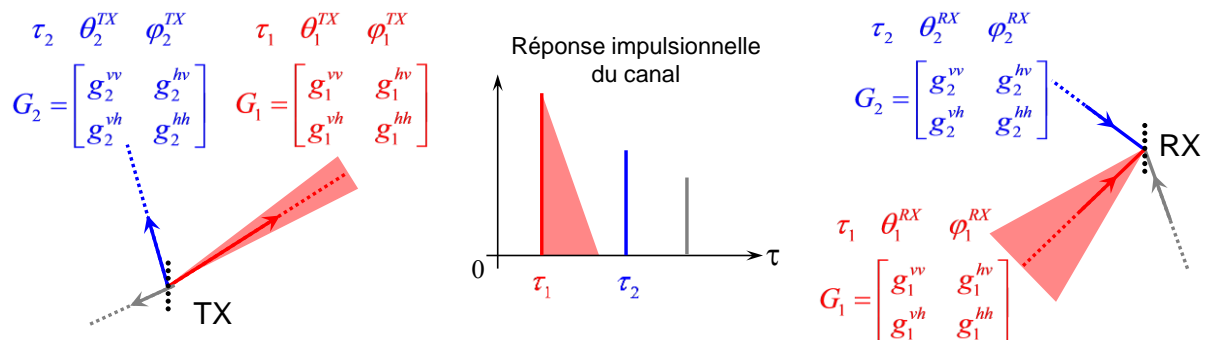


Figure 6 : Modélisation doublement directionnelle

En raison de l'existence de la composante diffuse dans le canal, cette modélisation discrète n'est généralement pas suffisante pour bien représenter la capacité du canal de transmission. Il convient d'ajouter une composante spatiale aléatoire distribuée non uniformément pour aboutir à une bonne adéquation avec l'expérience. A titre de justification, un exemple avec différentes modélisations de la composante diffuse est rapporté sur la Figure 7. On constate que le modèle permettant de mieux rendre compte de la capacité réelle comporte une distribution de trajets diffus non uniforme.

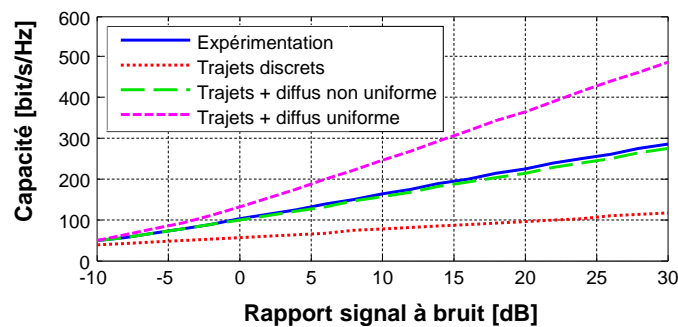


Figure 7 : Capacité d'un canal MIMO 180×180 en environnement résidentiel (Mesure et différents modèles)

Conclusion

Initialement développée pour les applications radar, la technique de transmission UWB a suscité un intérêt grandissant à partir de 2002, lorsque la FCC a autorisé l'utilisation de ces signaux pour les communications radio à courte portée. La grande capacité offerte par cette technologie permet en effet de fournir un lien radio pour les applications à très haut débit comme la vidéo à haute définition ou le transfert rapide de données. Cet article a détaillé les outils nécessaires à la connaissance du milieu de transmission UWB : les techniques de sondage, la caractérisation expérimentale du canal de propagation, et sa modélisation statistique. Parmi les caractéristiques principales du canal UWB, on note une dépendance forte des pertes par propagation en fonction de la distance et de l'environnement, et surtout en fonction de la fréquence. En raison de la

largeur de la bande analysée, la RI du canal présente une très fine résolution temporelle, où l'on distingue un grand nombre de trajets de propagation discrets ainsi qu'une quantité importante de signal diffus. Les dernières avancées en termes de caractérisation concernent le domaine spatial, qui peut être investigué par le déploiement de sondeurs multi-capteurs. La connaissance des directions de départ et d'arrivée des trajets de propagation, ainsi que de la diversité de polarisation, permet de spécifier des systèmes MIMO, capables d'augmenter la capacité de manière significative. Des modèles statistiques standards du canal de propagation UWB SISO ont été définis au sein du groupe de travail IEEE 802.15. Ces modèles de propagation à l'intérieur des bâtiments permettent une évaluation reproductible des performances des systèmes UWB. L'extension de ces modèles standards au domaine spatial reste à l'étude pour la simulation des futurs systèmes UWB MIMO. Enfin, l'étude du canal de propagation UWB présente de nombreuses perspectives pour de nouveaux scénarios d'usage. D'une part, les applications visées demandent de plus en plus des informations de localisation en complément du lien de communication. D'autre part, des environnements nouveaux sont aujourd'hui à l'étude, comme les milieux confinés (cabines d'avions et autres véhicules), ou encore les réseaux de capteurs corporels.

Bibliographie

- [1] M.-G. Di Benedetto, T. Kaiser, A. F. Molisch, I. Oppermann, C. Politano et D. Porcino, *UWB Communication Systems: A Comprehensive Overview*, New York: Hindawi Publishing Corporation, 2006.
- [2] X. Begaud, *Ultra Wide Band Antennas*, London / Hoboken: ISTE / Wiley, 2013.
- [3] P. Pagani, F. Tchoffo Talom, P. Pajusco et B. Uguen, *Ultra-Wideband Radio Propagation Channels*, London / Hoboken: ISTE / Wiley, 2008.
- [4] J. Ahmadi-Shokouh et R. C. Qiu, «Ultra-wideband (UWB) communications channel measurements – a tutorial review,» *International Journal of Ultra Wideband Communications and Systems*, vol. 1, n° 11, pp. 11-31, 2009.
- [5] T. Kaiser et F. Zheng, *Ultra Wideband Systems with MIMO*, Chichester: Wiley, 2010.
- [6] A. F. Molisch, «Ultra-Wide-Band Propagation Channels,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, n° 12, pp. 353-371, 2009.
- [7] S. van Roy, C. Oestges, F. Horlin et P. De Doncker, «A Comprehensive Channel Model for UWB Multisensor Multiantenna Body Area Networks,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, n° 11, pp. 163-170, 2010.
- [8] S. Chiu, J. Chuang et D. G. Michelson, «Characterization of UWB Channel Impulse Responses Within the Passenger Cabin of a Boeing 737-200 Aircraft,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, n° 13, pp. 935-945, 2010.
- [9] T. Santos, J. Karedal, P. Almers, F. Tufvesson et A. F. Molisch, «Modeling the Ultra-Wideband Outdoor Channel: Measurements and Parameter Extraction Method,» *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, n° 11, pp. 282-290, 2010.
- [10] A. A. M. Saleh et R. A. Valenzuela, «A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation,» *IEEE*

Journal on Selected Areas in Communications, vol. 5, n° 12, pp. 128-137, 1987.

[11] A. Molisch, J. Foerster et M. Pendergrass, «Channel models for ultrawideband personal area networks,» IEEE Wireless Communications, vol. 10, n° 16, pp. 14-21, 2003.

[12] A. Molisch, D. Cassioli, C.-C. Chong, S. Emami, A. Fort, B. Kannan, J. Karedal, J. Kunisch, H. Schantz, K. Siwiak et M. Win, «A Comprehensive Standardized Model for Ultrawideband Propagation Channels,» IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 54, n° 111, pp. 3151-3166, 2006.

L'auteur (ou les auteurs)

Pascal Pagani est Maître de Conférences dans le département Micro-ondes de Telecom Bretagne. Diplômé de Telecom Bretagne et de l'Université de Bristol (2002), il a obtenu un doctorat en électronique de l'INSA de Rennes en 2005. De 2002 à 2012, il a mené des travaux de recherche au sein d'Orange Labs dans les domaines de la modélisation du canal de propagation UWB, et le développement de systèmes sans-fil et filaires pour les réseaux résidentiels. Ses travaux se concentrent aujourd'hui sur la propagation radio de la bande HF aux ondes millimétriques, ainsi que la transmission sur réseaux d'énergie.

Patrice Pajusco a obtenu son diplôme d'ingénieur SUPELEC en 1992. Il rejoint France Télécom R&D en 1993 où il mène des études sur les canaux de propagation large bande puis MIMO. En 1999, il prend la direction de l'équipe chargée de la modélisation de la propagation pour l'étude et le déploiement de systèmes radio (UMTS, WIFI, WIMAX...). Depuis 2008, il est responsable du département Micro-ondes de Telecom Bretagne. Ses activités de recherche portent sur la modélisation spatio-temporelle des canaux de propagation.

Summary

The Ultra-Wide Band (UWB) technology consists in transmitting radio signals over a wide frequency bandwidth, typically in the order of 500 MHz to several GHz. This specificity can be exploited to develop high data rate, indoor communication systems. For the design and assessment of such systems, an accurate knowledge of the propagation conditions is necessary. This paper presents a number of channel sounding techniques that can be deployed for this purpose. A focus is made on MIMO channel sounding, involving multiple antennas at both the transmitter and receiver. Experimental characterization of the UWB channel reveals a strong influence of both the distance and frequency on propagation losses. The high temporal resolution leads to a channel impulse response presenting a large number of discrete propagation paths, in addition to diffuse scattered signal. The paper details the statistical SISO UWB channel models developed within the IEEE 802.15 standardization group, and discusses the extension of statistical models to MIMO systems.