HAL open science

Combinaison des techniques OFDM et CDMA pour l'UWB haut débit

Emeric Gueguen, Nadia Madaoui, Jean-François Hélard

To cite this version:

Emeric Gueguen, Nadia Madaoui, Jean-François Hélard. Combinaison des techniques OFDM et CDMA pour l'UWB haut débit. 2006, 9 p. hal-00082962

HAL Id: hal-00082962

https://hal.science/hal-00082962v1

Submitted on 29 Jun 2006

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.

Comité National Français de Radioélectricité Scientifique
Section française de l'
Union Radio Scientifique Internationale
Siège social : Académie des Sciences, Quai de Conti – Paris

JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU CNFRS

" VERS DES RADIOCOMMUNICATIONS RECONFIGURABLES ET COGNITIVES"

PARIS, LES 28 ET 29 MARS 2006

Combinaison des techniques OFDM et CDMA pour l'UWB haut débit

Emeric Guéguen, Nadia Madaoui, Jean-François Hélard

IETR (Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes)
20 avenue des buttes de Coësmes. CS 14315. 35043 Rennes cedex.
(emeric.gueguen, nadia.madaoui, jean-francois.helard)@insa-rennes.fr

Résumé
Pour les systèmes WPAN, la gestion des ressources entre plusieurs utilisateurs d'une même picocellule ainsi que la co-existence de plusieurs picocellules sont des points importants à prendre en compte lors de l'optimisation d'un système UWB haut débit. Afin d'améliorer les performances de la solution Multi Band OFDM proposée par l'alliance MBOA, l'ajout d'une composante d'étalement selon l'axe fréquentiel s'avère une bonne solution pour faciliter la gestion des ressources, qui offre en outre une meilleure robustesse vis-à-vis de la sélectivité en fréquence du canal et des interférences à bande étroite. Le système SS-MC-MA que nous proposons, bénéficie non seulement des avantages du MC-CDMA apportés par l'étalement fréquentiel mais permet également une allocation dynamique des ressources plus efficace dans un contexte multi-utilisateurs et multi-picocellules. Ces améliorations peuvent être obtenues, sans augmenter la complexité du segment radio-fréquence par rapport à la solution MBOA.

Mots clés : SS-MC-MA (*Spread Spectrum - Multi Carrier - Multiple Access*), UWB (*Ultra Wide Band*), MB-OFDM (*MultiBand-OFDM*), Multi-utilisateurs, WPAN.

1. Introduction

Les systèmes radio ultra large bande UWB (*Ultra Wide Band*) sont aujourd'hui reconnues comme des solutions à fort potentiel pour les futurs réseaux personnels WPAN (*Wireless Personal Area Network*). Différentes approches de systèmes UWB sont étudiées et proposées suivant les objectifs visés en terme de services (localisation ou communication), de portée (faible ou moyenne) ou de débits (haut ou bas débits) conduisant à différentes formes d'ondes. La grande nouveauté de ce type de systèmes réside dans la possibilité d'un accès non régulé à la ressource spectrale permettant d'envisager une utilisation souple du canal radio pour un grand nombre d'applications. Le processus de normalisation conduit à l'IEEE par le Task Group 802.15.3a visant à définir une couche physique très haut débit pour ces réseaux personnels WPAN a vu émerger et s'affronter ces trois dernières années de nombreuses solutions qualifiées d'ultra large bande. En particulier, les solutions dites Multi Band OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), telles qu'elles sont envisagées au sein du consortium MBOA (*Multi Band OFDM Alliance*), sont aujourd'hui promues par des acteurs majeurs du domaine grand public et des composants [1], [2]. Elles présentent, il est vrai, un certain nombre d'avantages mais aussi des inconvénients. Après une analyse critique de la solution MBOA, cet article examine l'intérêt de rajouter une composante CDMA (*Code Division Multiple Access*) à un signal du type Multi Band OFDM. En particulier, il est montré que les solutions proposées reposant sur la

combinaison des techniques OFDM et CDMA offrent pour les futurs réseaux personnels WPAN de bonnes performances et une grande souplesse pour la gestion des ressources entre les utilisateurs d'une même picocellule.

2. Les contraintes de diffusion et la solution MBOA

En 2002, la FCC (*Federal Communications Commission*) a réglementé les systèmes UWB en imposant le masque spectral représenté sur la figure 1 pour limiter les puissances émises. Pour qu'un signal soit considéré comme UWB, sa largeur de bande doit être au minimum de 500 MHz ou présenter un rapport largeur de bande sur fréquence centrale supérieur à 0.2. La densité spectrale de puissance (DSP) ne doit pas, quant à elle, excéder -41.3 dBm/MHz. Le canal UWB, s'étendant de 3.1 à 10.6 GHz, est sélectif en fréquence et est considéré comme pratiquement invariant en temps. Les systèmes UWB proposés ne devront pas perturber les systèmes bandes étroites existants, comme par exemple ceux répondant au standard 802.11a à 5 GHz.

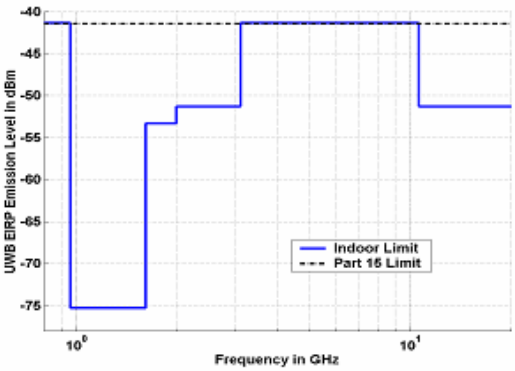

Figure 1. Masque de DSP indoor de la FCC

Aujourd'hui, au sein des instances de normalisation IEEE 802.15.3a, deux principaux types de solutions pour l'UWB à haut débit (*High Data Rate : HDR*) ont été proposés : la solution impulsionnelle sur porteuse DS-CDMA (*Direct Sequence Code Division Multiple Access*) et la solution multiporteuse, multibande [1]. Cette dernière, défendue par le consortium MBOA, propose de diviser la bande disponible en 14 sous-bandes de 528 MHz, comme le représente la figure 2.

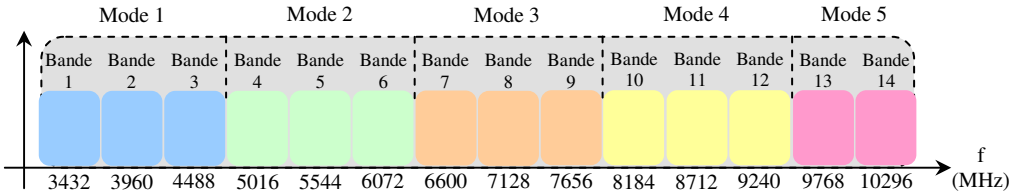

Figure 2. Organisation des modes de la solution MBOA

Chacune de ces sous-bandes permet la transmission d'un signal OFDM construit à partir d'une IFFT à 128 points. Dans un premier temps, les études s'intéressent au mode 1 regroupant les 3 premières sous-bandes comprises entre 3.1 et 4.8 GHz. La gestion multi-utilisateur dans une picocellule se fait au niveau de la couche PHY en TDMA (Time Division Multiple Access) par l'utilisation d'un code temps-fréquence TFC (*Time Frequency Code*). A un instant donné, chaque utilisateur occupe une sous-bande du mode 1 [2]. Le signal qui doit alors être échantillonné lors de la conversion analogique-numérique a une largeur limitée à 500 MHz, ce qui est tout à fait possible avec des composants bas coûts. Cependant, l'application du code temps-fréquence introduit à la fin de chaque symbole OFDM des sauts de fréquence d'une sous-bande à une autre, permettant ainsi à chaque utilisateur de bénéficier de la diversité en fréquence liée à la largeur de 3 sous-bandes dans le mode 1. Par ailleurs, chaque utilisateur n'émettant dans une sous-bande donnée que un tiers du temps, cela permet d'optimiser la puissance émise tout en respectant le masque de DSP imposé par la FCC. Enfin, il est également préconisé de prévoir la cohabitation de 4 piconets dans un même environnement.

Principaux paramètres de la solution MBOA :
Les débits transmis dans chaque sous-bande dépendent en premier lieu du rendement de codage, la modulation appliquée aux différentes porteuses du multiplex OFDM étant une MDP4. Ces différents modes de fonctionnement correspondants à des débits allant de 53.3 à 480 Mbit/s sont regroupés dans le tableau 1.

Débit utile (Mbit/s)	Modulation	Rendement de codage R	Conjugué symétrique à l'entrée de la FFT	Etalement en temps	Nombre de bits transmis par symbole OFDM
53.3	MDP4	1/3	oui	2	100
80	MDP4	1/2	oui	2	100
110	MDP4	11/32	non	2	200
160	MDP4	1/2	non	2	200
200	MDP4	5/8	non	2	200
320	MDP4	1/2	non	1 : pas d'étalement	200
400	MDP4	5/8	non	1 : pas d'étalement	200
480	MDP4	3/4	non	1 : pas d'étalement	200

Tableau 1. Débits transmis dans les différents modes - solution MBOA

Le code de base est un code convolutif à 64 états de rendement 1/3 (polynômes $g0 = 133_8$, $g1 = 165_8$ et $g2 = 171_8$) qui est poinçonné pour obtenir les autres rendements. Pour certains modes, chaque symbole complexe et son conjugué symétrique sont transmis au sein du même symbole OFDM respectivement par une porteuse et la porteuse « miroir ». Ceci permet d'exploiter la diversité en fréquence à l'intérieur de chaque sous-bande au prix d'une division par 2 du débit utile transmis. En outre, pour les modes correspondants aux débits allant de 53.3 Mbit/s à 200 Mbit/s, un étalement temporel de 2 est appliqué, consistant à transmettre la même information durant 2 symboles OFDM consécutifs afin de bénéficier globalement, grâce à l'application conjointe du TFC, d'une meilleure diversité en fréquence. Enfin, un entrelacement sur les données binaires générées par le codeur est appliqué en deux temps : l'entrelacement au niveau «symbole» permute des éléments binaires sur un horizon de 6 symboles OFDM alors que l'entrelacement au niveau «porteuse» permutent des éléments binaires portés par des porteuses d'un même symbole OFDM.

Les principaux paramètres OFDM de la solution MBOA sont résumés dans le tableau 2.

Paramètre	Valeur
Taille de la FFT	128
Fréquence d'échantillonnage	528 MHz
Bande de transmission	507.37 MHz
Nombre de sous-porteuses données	100
Nombre de sous-porteuses pilotes	12
Nombre de sous-porteuses de garde	10
N_{ST} : Nombre total de sous-porteuses utilisées	122
Δ_F : Espacement inter-porteuses	4.125 MHz (=528MHz/128)
T_{FFT} : Durée utile d'un symbole OFDM	242.42 ns ($1/\Delta_F$)
T_{CP} : Durée du préfixe ZP	60.61 ns
T_{GI} : Durée de l'intervalle de garde ZP	9.47 ns
T_{SYM} : Intervalle entre deux symboles	312.5 ns ($T_{FFT} + T_{CP} + T_{GI}$)

Tableau 2. Principaux paramètres OFDM - solution MBOA

La taille de la FFT est de 128 et le nombre total de sous-porteuses utilisées est de 122. La durée « utile » de chaque symbole OFDM est de 242 ns, conduisant à un espacement interporteuse Δ_F = 4.125 MHz. Un préfixe cyclique de type « *Zero-Padding* », de durée 60.61 ns pour absorber l'interférence entre symboles est inséré à la fin de chaque symbole OFDM. Par ailleurs, un intervalle de garde additionnel, également de type « *Zero-Padding* », de 9.47 ns est prévu pour la commutation d'une sous-bande à l'autre. La description complète de cette solution MBOA est donnée dans [1], et on trouvera une analyse précise de ces performances dans [3] dans le cas d'une estimation de canal parfaite et réelle.

En résumé, la solution MBOA présente, il est vrai, des avantages pour les applications UWB haut débit à savoir la robustesse du signal contre la sélectivité du canal et son efficacité pour l'exploitation positive de l'énergie liée à tout signal reçu dans un horizon inférieur à la durée du préfixe. Cet argument en faveur des solutions multiporteuses en général, est souvent cité dans le cas de la solution MBOA lorsqu'on la compare à

la solution concurrente DS-CDMA, qui peut difficilement tirer parti de toute l'énergie reçue, le nombre de « doigts » du récepteur RAKE étant obligatoirement limité pour des raisons de complexité. Cependant, les degrés de liberté de la solution MBOA restent relativement limités dans un contexte multi-utilisateurs et multi-pico-cellulaires. En particulier, lorsque nous considérons uniquement les 3 premières sous-bandes du mode 1, des conflits apparaissent dès le quatrième utilisateur à l'intérieur d'une cellule, alors que des scénarios allant jusqu'à 6 utilisateurs sont classiquement envisagés.

3. Apport du CDMA à la solution MB-OFDM

Partant de la solution MB-OFDM, des études ont déjà proposé d'ajouter une composante CDMA (Code Division Multiple Access) afin d'améliorer la robustesse du système ou le partage des ressources entre plusieurs utilisateurs. En effet, cette composante d'étalement permet en particulier d'organiser l'accès de plusieurs usagers à une ressource commune. Compte tenu des caractéristiques du canal UWB, sélectif en fréquence et variant peu dans le temps dans un environnement indoor, l'étalement est généralement effectué selon l'axe fréquentiel. Les symboles de tous les utilisateurs sont alors transmis par l'ensemble des sous-porteuses du spectre, la longueur des codes d'étalement étant inférieure ou égale au nombre de sous-porteuses du multiplex OFDM (figure 3). Dans ce cas, on parle de signaux de type MC-CDMA (Multi Carrier-CDMA) [4, 5, 6, 7]. Par ailleurs, la référence [8] compare un système OFDM et un système MC-CDMA dans le cas d'applications UWB à 60 GHz. D'une manière générale, ces différentes contributions montrent que, par rapport à la solution MBOA « classique », outre une plus grande facilité dans le partage des ressources dans le cas de plusieurs utilisateurs, un système MC-CDMA présente également une meilleure robustesse vis-à-vis de la sélectivité en fréquence du canal. En outre, l'ajout d'une composante d'étalement selon l'axe fréquentiel permet d'améliorer la robustesse du signal UWB vis-à-vis des brouilleurs à bande étroite. Ce dernier point est en effet fondamental dans le cas d'un accès non régulé à la ressource spectrale permettant d'envisager une utilisation souple du canal radio pour un grand nombre d'applications différentes. Cependant, dans certains cas [4], les auteurs proposent d'utiliser un signal MC-CDMA de largeur B_W = 1.58 GHz, correspondant à l'équivalent de 3 sous-bandes d'un signal MBOA, ce qui augmente notablement la fréquence d'échantillonnage nécessaire pour la conversion analogique-numérique.

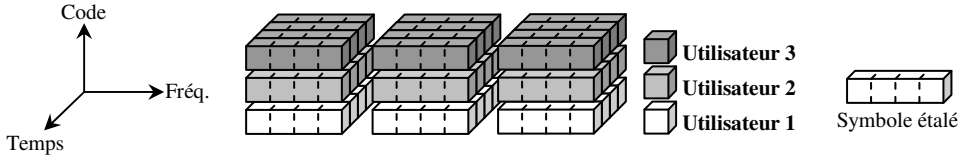

Figure 3. Illustration du principe du MC-CDMA

4. Une nouvelle forme d'onde pour l'UWB multi-bandes : le SS-MC-MA

En appliquant un code d'étalement et une composante multi-accès, nous proposons dans cet article une forme d'onde de type SS-MC-MA (Spread Spectrum – Multi Carrier – Multiple Access) [9], qui est nouvelle pour les applications UWB et qui permet d'améliorer les performances et d'apporter plus de souplesse dans la gestion des ressources. Compte tenu du contexte WPAN et des caractéristiques du canal UWB, nous choisissons d'effectuer un étalement dans le domaine fréquentiel. D'autre part, notamment pour des contraintes technologiques liées à la fonction de conversion analogique-numérique, la largeur de bande du signal émis à un instant donné sera limitée à 528 MHz et non à 1,584 GHz (correspondant aux 3 sous-bandes du mode 1) comme proposé dans [4]. L'utilisation de techniques de sauts de fréquence sur les 3 sous-bandes, comme déjà envisagée par la solution MBOA, permet de bénéficier de l'indépendance en fréquence liée à la bande totale de 1,584 GHz.

Principe du SS-MC-MA

Avec la technique MC-CDMA, le partage des ressources est réalisé par l'attribution à chaque utilisateur d'un ou de plusieurs codes, qui sont transmis sur l'ensemble de la bande disponible. Ainsi, toutes les sous-porteuses de l'ensemble du spectre alloué transmettent les symboles de tous les utilisateurs différenciés par leur code. On parle alors d'un système mono-bloc (figure 3).

Dans un système multi-blocs, on subdivise le spectre en plusieurs « blocs » de sous-porteuses. Parmi les combinaisons possibles d'un tel système, la solution SS-MC-MA, illustrée figure 4, consiste à attribuer à chaque utilisateur un bloc de sous-porteuses qui lui est propre, en respectant un schéma de multiplexage fréquentiel FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). La dimension des codes pourra alors être exploitée pour une optimisation et un partage adaptatif des ressources (type de modulation, débit…). L'étalement selon l'axe fréquentiel permet de bénéficier d'un gain de diversité et, comme dans le cas d'un signal MC-CDMA, d'améliorer la robustesse du signal UWB vis-à-vis des brouilleurs à bande étroite. Avec un signal SS-MC-MA, les symboles transmis simultanément sur un sous-ensemble de sous-porteuses sont émis par le même utilisateur et subissent les mêmes distorsions. La self-interférence (SI), qui remplace alors l'interférence d'accès multiple (MAI) obtenue dans le cas de signaux MC-CDMA, peut alors être facilement compensée par une détection mono-utilisateur à un seul coefficient complexe par sous-porteuse.

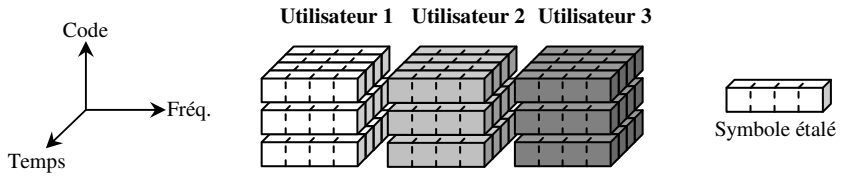

Figure 4. Illustration du principe du système SS-MC-MA

Avantages du SS-MC-MA par rapport à la solution MBOA et au MC-CDMA

Nous nous plaçons dans le cas de la norme MBOA en considérant le mode 1 (figure 2).

- Cas de trois utilisateurs maximum
  Dans le cas de trois utilisateurs, le système SS-MC-MA permet d'allouer en continu une sous-bande de 528 MHz à chaque utilisateur. Ce système permet de garder les performances et les avantages d'un système MC-CDMA tout en apportant un degré de liberté supplémentaire par rapport à la solution MBOA pour l'allocation dynamique des ressources, via l'attribution d'un nombre donné de codes d'étalement. Un autre intérêt, par rapport cette fois-ci à un système MC-CDMA, est une estimation de canal en réception simplifiée. En effet, une même sous-porteuse n'est affectée que par un seul canal, celui de l'utilisateur associé à cette sous-porteuse. En revanche, avec un système MC-CDMA, une sous-porteuse est affectée par les différents canaux des différents utilisateurs, ce qui augmente de manière non négligeable la complexité de l'estimation de canal, chaque utilisateur devant estimer la réponse de plusieurs canaux sur l'ensemble de la bande disponible.
- Cas de plus de 3 utilisateurs
  Dans la solution MBOA, dès quatre utilisateurs, des conflits apparaissent pouvant entraîner des pertes d'information. Dans le cas du SS-MC-MA, la dimension des codes pourra être exploitée pour partager une même sous-bande de 528 MHz entre 2 voire 3 utilisateurs si nécessaire. Dans un bloc donné, le signal généré correspond alors à un signal MC-CDMA, mais avec un nombre très limité d'utilisateurs par bloc (2 voire 3).

De manière plus générale, dans un contexte multi-picocellule, la souplesse apportée par le partage des ressources, en jouant sur le nombre de codes d'étalement attribués à un utilisateur donné dans une picocellule donnée, permet au système SS-MC-MA d'offrir une allocation dynamique des ressources plus performante qu'un système MBOA.

5. Description du système proposé

Les système étudié

Le système proposé reste très proche de la solution MBOA. La figure 5 représente la chaîne de transmission MBOA en trait plein et les fonctions à rajouter pour obtenir un signal SS-MC-MA sont rajoutées en traits pointillés. Ces fonctions sont principalement la Transformée d'Hadamard (« Fast Hadamard Transform : FHT) à l'émission et la Transformée inverse (Inverse FHT) en réception. Par ailleurs, la détection appliquée est du type « *Zero Forcing* » ou *MMSE (Minimum Mean Square Error).*

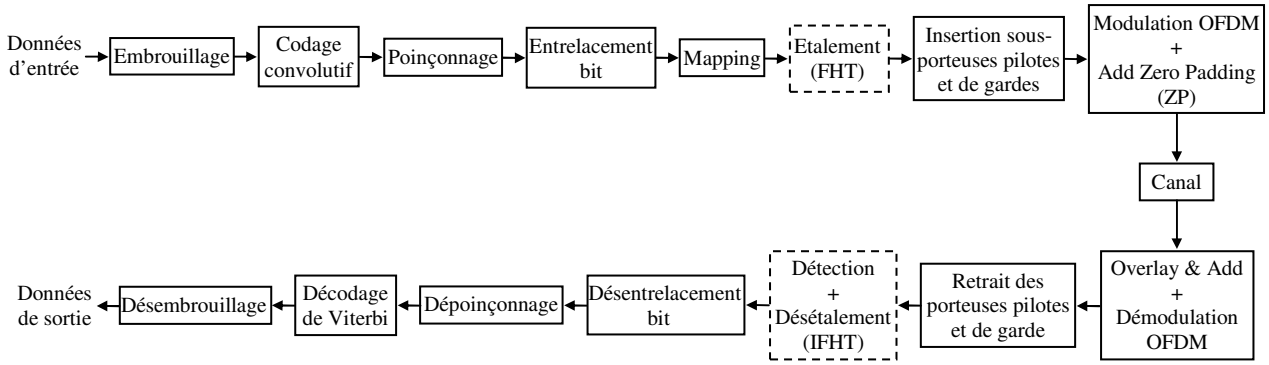

Figure 5. Chaîne de transmission MBOA (SS-MC-MA en traits pointillés)

La longueur d'étalement L a été choisie égale à 16 et le nombre de sous-porteuses de données est ramené de 100 à 6X16 = 96 pour chaque symbole OFDM. Cela signifie que 4 sous-porteuses de garde supplémentaires ont été rajoutées. Les autres fonctions restent inchangées. En particulier, l'utilisation d'un préfixe de type « *zero padding* » nécessite de faire une opération « *overlay and add* » [10] avant la FFT de démodulation, afin de restaurer l'orthogonalité entre les différentes sous-porteuses du multiplex.

Expression des signaux

Dans le cas de la solution MBOA, le signal généré en sortie de la FFT inverse en émission est de la forme :

$$S_{OFDM}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-N_{ST}/2}^{n=-N_{ST}/2} X_n(i)\, p_c(t - iT_{SYM})\, e^{j2\pi n\Delta_F (t - iT_{SYM})} \tag{1}$$

où Δ_F, N_{ST} *et* T_{SYM} représentent respectivement l'écart inter-porteuse, le nombre total de sous-porteuses et l'espacement entre deux symboles OFDM consécutifs. $X_n(i)$ est le symbole complexe, appartenant à une constellation MDP4 et transmis par la porteuse n durant le symbole OFDM i. Il représente une donnée, un pilote ou un symbole de référence. $p_c(t)$ est une fenêtre rectangulaire définie par :

$$p_c(t) = \begin{cases} 1, & 0 \le t \le T_{FFT} \\ 0, & T_{FFT} \le t \le T_{FFT} + T_{CP} + T_{GI} \end{cases} \tag{2}$$

Dans le cas d'un signal SS-MC-MA, les symboles complexes sont convertis en P symboles parallèles $D_l(i)$ (avec $P \le L$), qui seront transmis sur les mêmes L sous-porteuses. P représentant donc la charge, est par exemple égal à L dans le cas de la pleine charge et égal à $L/2$ à demi-charge. $C_l = [c_{l,1} \ldots c_{l,m} \ldots c_{l,L}]$ est le $l^{\text{ième}}$ code d'étalement orthogonal de Walsh-Hadamard. Dans ce cas, la forme d'onde est du même type que précédemment, mais le symbole complexe $X_m(i)$ transmis par la $m^{\text{ième}}$ porteuse (m variant de 1 à L=16, avec $m = n$ modulo(16)) d'un bloc de L = 16 porteuses reliées par les mêmes codes d'étalement de longueur L peut s'exprimer par :

$$X_m(i) = \sum_{l=1}^{l=P} D_l(i) c_{l,m} \tag{3}$$

où les $D_l(i)$ représentent les P symboles complexes, appartenant à une constellation MDP4 et transmis par le bloc de L sous-porteuses considéré durant le symbole OFDM i. En réception, comme pour l'égalisation dans le cas d'un système OFDM classique, la détection mono-utilisateur consiste à multiplier par un coefficient complexe l'échantillon délivré en sortie de la FFT de démodulation pour chaque sous-porteuse. Les deux techniques utilisées peuvent être le Zero Forcing et le MMSE pour lesquelles les coefficients sont respectivement donnés par :

$$g_{n,i} = \frac{1}{h_{n,i}} \qquad \textit{Zero Forcing}$$

$$g_{n,i} = \frac{h_{n,i}^{*}}{\left|h_{n,i}\right|^{2} + \frac{1}{\gamma_{n,i}}} \qquad \textit{MMSE} \tag{4}$$

où $h_{n,i}$ et $\gamma_{n,i}$ représentent respectivement la réponse complexe du canal et le rapport signal à bruit pour la sous-porteuse n du symbole i.

Modélisation du canal UWB

Les canaux de propagation large bande utilisés pour l'évaluation de la couche physique des systèmes UWB résultent du modèle de Saleh-Valenzuela pour les applications *indoor* [11]. Ce modèle en rayons prend en compte les phénomènes de *clusters* mis en évidence lors des mesures des canaux. La réponse impulsionnelle du canal multi-trajets pour le $k^{ième}$ utilisateur est donnée par :

$$h_k(t) = \sum_{m=0}^{M_k} \sum_{p=0}^{P_k} \alpha_k(m,p)\delta(t - T_k(m) - \tau_k(m,p)) \tag{5}$$

où $T_k(m)$ est le retard du cluster m, $\alpha_k(m,p)$ et $\tau_k(m,p)$ sont respectivement le gain et le retard du trajet p au sein du *cluster m*. Le retard moyen des trajets (mean excess delay : τ_m) et la dispersion des retards (root mean square delay spread τ_{rms}) sont donnés dans le tableau 3 pour les 4 modèles de canaux CMi i = {1, …,4}.

Caractéristiques	CM1	CM2	CM3	CM4
Retard moyen des trajets (ns) : τ_m	5.05	10.38	14.18	
Dispersion des retards : τ_{rms}	5.28	8.03	14.28	25
Distance (m)	< 4	< 4	4 - 10	10
LOS/NLOS	LOS	NLOS	NLOS	NLOS

Tableau 3. Caractéristiques large bande des canaux CMi

Dans les configurations LOS (*Line Of Sight*), les antennes d'émission et de réception sont en visibilité, alors qu'elles ne le sont pas dans la configuration NLOS (*Non Line Of Sight*). Dans l'hypothèse où la durée du préfixe est supérieure à l'étalement de la réponse impulsionnelle du canal et que le nombre de sous-porteuses N_{ST} est suffisamment grand pour garantir la non-sélectivité en fréquence du canal sur chacune de ces sous-porteuses, le canal UWB peut être modélisé sous la forme de N_{ST} sous-canaux. Dans ce cas la réponse en fréquence pour la sous-porteuse n pour le $k^{ième}$ utilisateur est donné par :

$$H_k(n) = \sum_{m=0}^{M_k} \sum_{p=0}^{P_k} \alpha_k(m,p) e^{-j2\pi n \Delta_F (T_k(m) + \tau_k(m,p))} \tag{6}$$

où Δ_F est l'espacement inter-porteuses.

Le canal est ainsi modélisé en fréquence, et pour chaque sous-bande, il est normalisé en énergie moyenne pour chaque réalisation. 100 réalisations différentes sont utilisées pour chaque sous-bande, une réalisation étant appliquée durant toute la longueur d'une trame.

5. Performances des différents systèmes

Dans un premier temps, les performances du système MBOA ont été évaluées sur les différents canaux UWB. Les figures 6a et 6b donnent les résultats obtenus sur les 2 canaux CM1 et CM4 dans le cas d'une estimation de canal parfaite et pour les différents modes de fonctionnement correspondant à des débits variant de 480 à 53.3 Mbits/s. Ces résultats sont donnés en fonction du rapport E_b/N_0 , qui représente le rapport entre l'énergie par bit utile et la densité spectrale monolatérale du bruit. Les performances du système MBOA obtenues dans un canal gaussien pour le mode à 320 Mbit/s sont également données en référence.

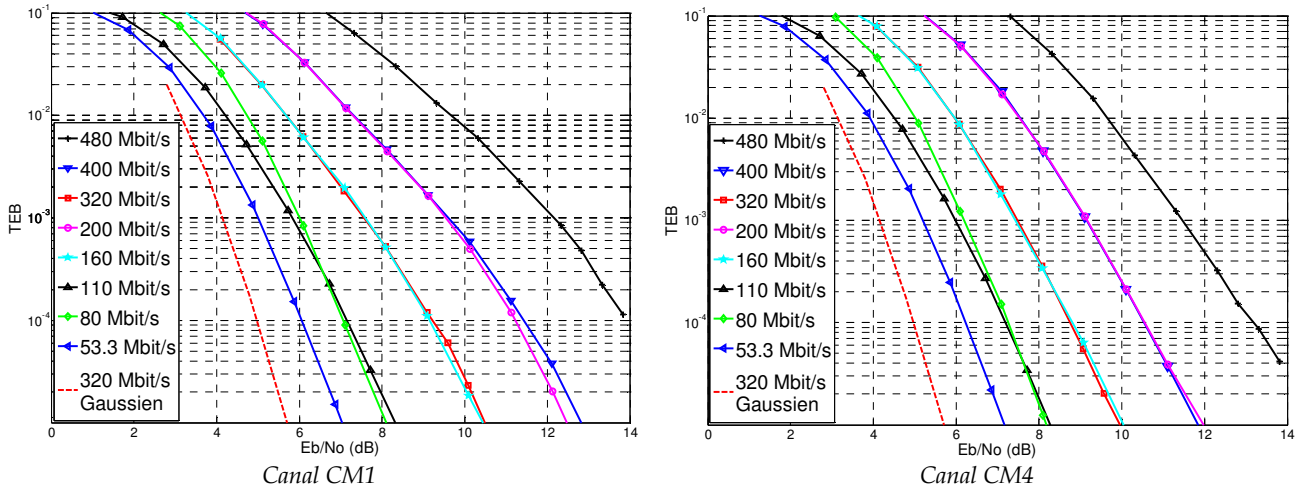

Figure 6. Performances du système MBOA

Les performances obtenues pour chaque mode avec les deux canaux sont très proches. Elles sont légèrement supérieures avec le canal CM4 car, d'une part le signal bénéficie dans ce cas d'une meilleure diversité en fréquence et d'autre part, la modélisation dans le domaine fréquentiel du canal ne permet pas de prendre en compte les effets des rares trajets qui pourraient en présence du canal CM4 dépasser l'intervalle de garde et provoquer de l'interférence interporteuse. Les résultats obtenus dans les modes 320 et 160 Mbit/s sont pratiquement identiques lorsqu'on les présente en fonction du rapport E_b/N_0, car l'application de l'étalement sur deux symboles consécutifs dans le mode 160 Mbit/s n'apporte aucune diversité, le canal étant identique pour les deux symboles en question.

Dans le cas du système SS-MC-MA, le nombre de sous-porteuses de données est de 96 et non plus 100 afin d'obtenir un multiple de la longueur d'étalement L choisie égale à 16. Le nombre total N_{ST} de sous-porteuses utilisées devient égal à 118 et la bande de transmission à considérer est de 490.87 MHz au lieu de 507.37 MHz. En conséquence, lorsque le rendement R du codage de canal est égal à ½, les débits obtenus sont par exemple de 307 Mbit/s pour un système à pleine charge (avec $P = L = 16$). Les résultats obtenus pour ce dernier cas sont illustrés à la figure 7 dans le cas d'une détection MMSE et en présence des canaux gaussien, CM1 et CM4.

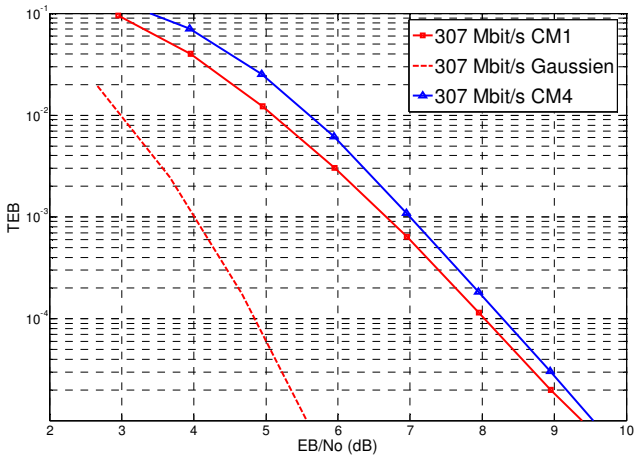

Figure 7. Performances du système SS-MC-MA

La forme d'onde SS-MC-MA permet d'apporter de la souplesse pour la gestion des ressources en exploitant les différents modes. Pour ces derniers, la possibilité de pouvoir modifier le nombre de séquences d'étalement allouées pour obtenir le débit souhaité permet d'obtenir un système qui est plus performant que la solution MBOA, en particulier dans le cas des modes à « faible » débit. Par exemple, les performances obtenues avec les systèmes SS-MC-MA à 153.3 (8 séquences d'étalement attribuées) et 57.5 Mbit/s (3 séquences d'étalement attribuées) peuvent s'avérer plus intéressantes que celles du système MBOA à 160 et 80 Mbit/s respectivement. Il est vrai que les solutions choisies par le consortium MBOA (étalement en temps

et conjugué symétrique) pour améliorer les performances des modes à bas débit ne sont pas les plus performantes.

Par ailleurs, l'ajustement du débit par l'attribution d'un nombre de séquences d'étalement dans le cas d'un système SS-MC-MA permet d'obtenir une résolution plus fine que dans le cas du système MBOA, qui utilise le poinçonnage du code de canal. En outre, si on choisit une longueur d'étalement *L* plus élevée par exemple L = 32, cette résolution peut être encore améliorée d'un facteur 2. Enfin, l'ajout d'une composante d'étalement permet sans aucune difficulté ni augmentation de la complexité d'une part, et sans altérer les performances d'autre part, de « gérer » en mode 1 plus de 3 utilisateurs et facilite la cohabitation entre plusieurs cellules voisines.

Conclusion

Afin d'améliorer les performances de la solution MBOA et notamment pour une meilleure gestion des ressources dans un contexte multi-utilisateurs, l'ajout d'une composante d'étalement selon l'axe fréquentiel s'avère une bonne solution, qui offre en outre une meilleure robustesse vis à vis de la sélectivité en fréquence du canal et des interférences à bande étroite. Le système SS-MC-MA que nous proposons, bénéficie non seulement des avantages du MC-CDMA apportés par l'étalement fréquentiel mais permet également une allocation dynamique des ressources plus efficace dans un contexte multi-utilisateurs et multi-picocellules. Ces améliorations peuvent être obtenues, sans pour autant augmenter de manière significative la complexité par rapport à la solution MBOA de référence. En particulier, la largeur de bande restant égale à 528 MHz, toutes les contraintes concernant le segment radio-fréquences et la conversion analogique-numérique restent inchangées.

Remerciements : Les auteurs remercient France Télécom R&D/RESA/BWA qui a soutenu ce travail dans le cadre du contrat 46136582.

Références bibliographiques

[1] IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), "*Multi-band OFDM Physical Layer Proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a*", September 2004.

[2] A. Batra & al., "*Design of Multiband OFDM System for realistic UWB Channel Environments*", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 52, No 9, September 2004.

[3] L. Maret, I. Siaud, "*Ultra-Wideband MBOA Physical layer performance analysis and enhanced issues (IST MAGNET project)*", ECPS conference, Brest, France, 15-18 March 2005.
(paper) 1572-9451 (Online), Vol. 30, N° 1-3, November 2005, pp. 193-214.

[4] Y-B. Park, C-S. Kim, K-K. Cho, C-J. Lee, H-K. Lee, J-M. Kim, & K-S. Kwak, "*Performance of UWB DS-CDMA/OFDM/MC-CDMA System*", 47th IEEE International Midwest Symposium on Circuit and Systems (2004).

[5] M. Schmidt & F. Jondral, "*Ultra Wideband Transmission based on MC-CDMA*", IEEE GLOBECOM conference 2003.

[6] W.T. Tung & J. Wang, "*MMSE Receiver for Multicarrier CDMA Overlay in Ultra-Wide-Band Communications*", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 54, No. 2, March 2005, pp. 603-614.

[7] J. Wang & L.B. Milstein, "*Multicarrier CDMA overlay for Ultra-Wideband communications*", IEEE Transactions on Communications, Vol. 52, N° 10, October 2004, pp. 1664-1669.

[8] I. Siaud, R. Legouable, "*Ultra WideBand MultiCarrier Spread Spectrum techniques for short range radio communications at 60 GHz*", Wireless World Research Forum WWRF#14, 7-8 July 2005.

[9] L. Cariou & J-F. Hélard, "*A novel uplink transmission system based on MIMO frequency hopping SS-MC-MA for the future wireless cellular networks*", Telecommunications System Journal, ISSN 1018-4864 (paper) 1572-9451 (Online), Vol. 30, N° 1-3, November 2005, pp. 193-214.

[10] B. Muquet, A. Wang, G. B. Giannakis, M. De Courville, P. Duhamel, "*Cyclic prefix or zero padding for wireless multicarrier transmission?*", IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, December 2002, pp. 2136-2148.

[11] A. Saleh & R. Valenzuela, "*A statistical model for indoor multipath propagation*", IEEE JSAC, Vol. SAC-5, N° 2, February 1987, pp. 128-137.