Nouvelles formes d'ondes par paquets d'ondelettes pour les modulations multiporteuses

Matthieu GAUTIER[1], Marylin ARNDT[1], Joël LIENARD[2]

[1]France Telecom R&D
28 chemin du vieux chêne, 38243 Meylan, France

[2]GIPSA-Lab
961 rue de la Houille Blanche, 38402 Saint Martin d'Hères, France

matthieu.gautier@orange-ftgroup.com, marylin.arndt@orange-ftgroup.com
joel.lienard@lis.inpg.fr

Résumé – La qualité d'une transmission multiporteuses dépend directement des formes d'onde modulantes utilisées. Dans cet article, la Wavelet Packet Modulation (WPM) est appliquée aux communications sans fil et une nouvelle modulation est proposée qui utilise les ondelettes complexes. Nous montrons que, pour une transmission à travers un canal multi-trajets, l'utilisation des ondelettes complexes permet d'améliorer l'utilisation des ondelettes réelles. Nous montrons également que l'utilisation des ondelettes permet de réduire considérablement les fluctuations d'enveloppe du signal transmis. Les performances de la WPM sont comparées à celle de la modulation OFDM.

Abstract – The quality of a multicarrier transmission depends directly on the modulating pulse shaping used. In this paper, the Wavelet Packet Modulation (WPM) is applied to wireless communications and a new wavelet based multicarrier modulation is proposed which used complex wavelets. We show that, for a multipath channel transmission, the use of complex wavelet outperforms the use of the real one. We also show that multicarrier systems using the wavelet approach significantly reduces the Peak-to-Average Power Ratio of the transmitted signal. The performances of the WPM are compared with OFDM modulation.

1 Introduction

Cet article porte sur l'amélioration de la technique de modulation multiporteuses OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [1] classiquement utilisée. Cette modulation est associée à un préfixe cyclique afin de supprimer les interférences inhérentes à la transmission à travers les canaux dispersifs en temps. Cette méthode offre une grande robustesse aux multitrajets au détriment d'une perte d'efficacité spectrale.
La limitation de cette réduction de l'efficacité spectrale constitue un défi pour les communications numériques. Afin d'essayer d'apporter une réponse, l'idée directrice de cet article est basée sur ces deux approches conjointes [2] :

- l'utilisation d'une forme d'onde modulante $\psi(t)$ bien localisée en temps et en fréquence pour limiter les interférences ;
- l'application des bancs de filtres aux modulations multiporteuses permettant de nouvelles formes de modulations multiporteuses plus générales.

Ces deux pistes d'étude sous-tendent l'idée de l'amélioration d'une modulation multiporteuses basée sur la théorie des ondelettes. Ainsi, par le biais du formalisme des ondelettes, nous avons montré [3] qu'il est possible de construire une base de fonctions orthogonales permettant de mettre au point un système de communication multiporteuses réduisant la sensibilité aux interférences introduites par le canal de propagation. Cette modulation multiporteuses est appelée WPM (Wavelet Packet Modulation) et a été introduite par A.R. Lindsey [4]. Le concept de la modulation multiporteuses basée sur les ondelettes est présenté dans la partie 2.
Des études [3] sur le choix de l'onde $\psi(t)$ sont associées à l'évaluation de la WPM. Dans cette article, ce choix est discuté pour la transmission à travers un canal radioélectrique (partie 3) et pour son influence sur les fluctuations d'enveloppe du signal transmis (partie 4).

2 Descrition du système

Le concept de la transformée en ondelettes a été étendu par la création de bases orthogonales qui sont obtenues par une structure en arbre comme le montre la figure 1. Cette décomposition [5] permet une analyse spectrale uniforme dont la précision dépend de la profondeur de l'arbre.
Les fonctions ainsi obtenues sont des paquets d'ondelettes qui sont déterminés récursivement par :

$$\psi^{2k}(t) = \sqrt{2}\sum_n h_n \psi^k(2t-n), \tag{1}$$

$$\psi^{2k+1}(t) = \sqrt{2}\sum_n g_n \psi^k(2t-n). \tag{2}$$

ψ_0 représente la fonction d'échelle mère et ψ_1 la fonction d'ondelette associée.
Les filtres h_n et g_n sont des Filtres Miroirs en Quadrature (FMQ). h_n est un filtre passe-bas et g_n est un filtre passe-haut. Ils sont reliés par la relation $g_n = (-1)^n h_{1-n}$.

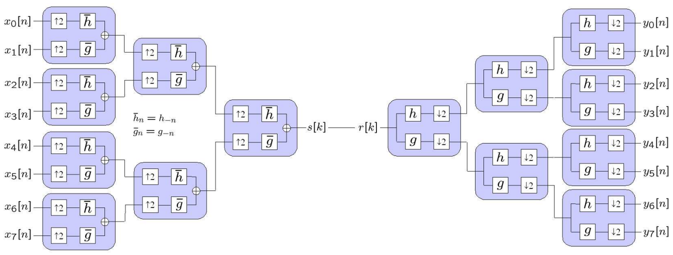

FIG. 1 – Emetteur et récepteur multiporteuses utilisant la modulation WPM

Définition : *Une base de paquet d'ondelettes de $L^2(\mathbb{R})$ est toute base orthonormée sélectionnée parmi les fonctions :*

$$\{\psi_{l,n}^k(t) = 2^{\frac{l}{2}}\psi^k(2^l t - n),\ (l,n) \in (\mathbb{Z},\mathbb{Z}),\ k \in \mathbb{N}\}. \quad (3)$$

Ainsi, toute fonction $s(t)$ de $L^2(\mathbb{R})$ peut être décomposée sur la base de fonctions $\{\psi_{l,n}^k(t),\ (l,n) \in (\mathbb{Z},\mathbb{Z})\}$:

$$s(t) = \sum_{n,k} x_k^l[n]\psi_{l,n}^k(t). \quad (4)$$

Les coefficients $x_k^l[n]$ à une échelle donnée l s'expriment comme un produit scalaire :

$$x_k^l[n] = < s, \psi_{l,n}^k > = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{l,n}^k(t)dt. \quad (5)$$

L'ensemble des coefficients $x_k^l[n]$ constitue l'analyse en paquets d'ondelettes discrètes (**DWPT - Discrete Wavelet Packet Transform**) de $s(t)$ et sa décomposition inverse est notée **IDWPT - Inverse DWPT**.

On peut ainsi définir le principe de la modulation multiporteuses utilisant les paquets d'ondelettes. Il s'agit à l'émission de transformer les symboles du domaine des ondelettes au domaine temporel par une IDWPT et à la réception de transformer le signal reçu du domaine temporel à celui des ondelettes par une DWPT. La modulation multiporteuses utilisant la transformée en paquets d'ondelettes s'appelle la **Wavelet Packet Modulation (WPM)** [4].

L'implémentation de l'émetteur et du récepteur WPM est effectuée par la détermination d'un banc de filtres uniforme (voir la figure 1). La décomposition en paquets d'ondelettes peut être calculée par une structure de filtres en arbre dont la profondeur détermine le nombre de porteuses du modulateur WPM. Le signal WPM est ensuite caractérisé par le choix de l'ondelette et son arbre de filtres associé. Ce choix détermine les formes d'onde modulantes et la complexité du système. Les ondelettes sont caractérisées par la taille L des filtres h et g associés.

3 Sensibilité aux canaux dispersif en temps et en fréquence

3.1 Contexte

La transmission à travers un canal multi-trajets est le scénario le plus important à traiter dans l'étude d'un système de communication. Le modèle WSSUS (Wide Sense Stationnary Uncorrelated Scatterers) [6] permet de décrire précisément un grand nombre d'environnements de transmission sans fil. Le retard maximal τ_L produit par le canal est appelé l'étalement temporel du canal et le décalage Doppler maximal f_d est appelé l'étalement fréquentiel du canal. L'effet de la dispersion temporelle du canal est caractérisé dans le domaine fréquentiel par la bande de cohérence B_c ($B_c \approx \frac{1}{\tau_L}$), la dispersion fréquentielle est caractérisée dans le domaine temporel par le temps de cohérence T_c ($T_c \approx \frac{1}{2f_d}$) .

3.2 Choix de la forme d'onde

La qualité d'une transmission multiporteuses dépend directement des formes d'onde modulantes utilisées. Ainsi, les interférences introduites par les multi-trajets sont d'autant plus faibles que la localisation fréquentielle des formes d'onde sera bonne [2]. C'est l'une des raisons qui motive le choix des ondelettes comme formes d'onde modulantes dans un système multiporteuses. Au prix d'une certaine complexité, nous avons vu que les ondelettes de Daubechies ou de Meyer ont une localisation fréquentielle plus faible que l'exponentielle fenêtrée utilisée comme forme d'onde par la modulation OFDM.

Le problème rencontré dans cette étude est la sensibilité de la modulation WPM aux décalages temporels induit par le canal. Cette sensibilité est illustrée par la figure 2. Contrairement à la DFT où un décalage temporel engendre un déphasage dans le domaine fréquentiel, la transformée en paquets d'ondelette ne rend pas stationnaire l'information par sous-bande, la figure 2 montre qu'un retard de propagation distribue l'énergie du signal sur plusieurs sous-bandes et instants voisins. Les interférences ainsi générées vont limiter les performances du système en dépit des bonnes propriétés des formes d'onde utilisées.

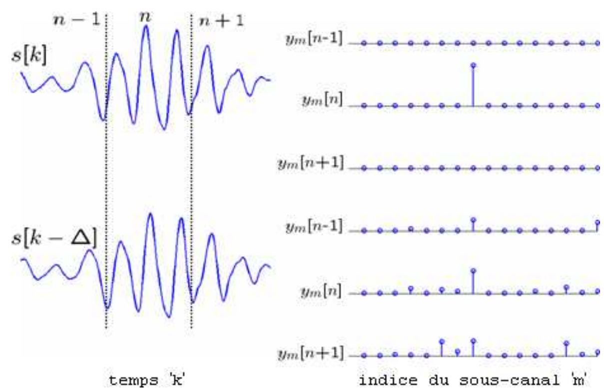

FIG. 2 – Sensibilité de la modulation WPM (Daubechies L=12) au décalage temporel.

La contribution majeure de cette étude est donc de réduire la sensibilité de la décomposition en paquets d'ondelettes par l'utilisation de formes d'onde complexes. Des travaux [7] ont été effectués pour synthétiser des versions complexes des ondelettes de Daubechies, la transformée résultante utilisant des paquets d'ondelettes complexes est moins sensible aux décalages temporels que celle utilisant des paquets d'ondelettes réels. Appliquées aux modulations multiporteuses, ces ondelettes complexes permettent de réduire l'effet des multi-trajets en sortie du démodulateur. Introduite dans [8], nous avons appelé l'application des ondelettes complexes aux modulations multiporteuses : la modulation **CWPM (Complex Wavelet Packet Modulation)**.

3.3 Performances de la WPM en présence d'un canal multi-trajets

Les performances de la modulation WPM sont comparées à la modulation OFDM utilisant un préfixe cyclique d'une durée égale à Δ_{CP}=$0, 2$xT_s, les systèmes utilisent M=128 sous-porteuses. Deux systèmes utilisant les ondelettes sont testés : la modulation WPM utilisant des ondelettes de Daubechies réelles et la modulation CWPM utilisant des ondelettes de Daubechies complexes. Tous les systèmes utilisent une égalisation à un coefficient multiplicatif par sous-canal. La qualité de la transmission dépend de l'étalement temporel τ_L du canal. Afin d'évaluer l'influence de τ_L sur les performances, un canal composé de 2 trajets est utilisé. Le signal reçu s'exprime :

$$r[n] = s[n] + \alpha[n - \tau_L] + b[n], \tag{6}$$

avec b un bruit blanc additif gaussien.
Les résultats en TEB en fonction de τ_L sont donnés pour une valeur de α de -3dB et un rapport signal sur bruit $\frac{E_b}{N_0}$ de 20dB et sont présentés sur la figure 3.

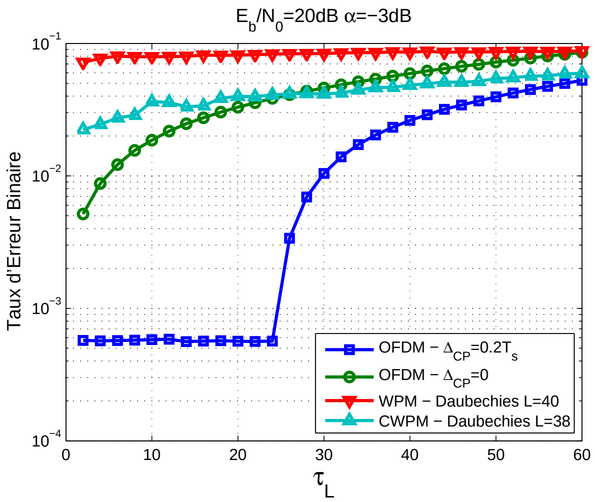

FIG. 3 – Taux d'Erreur Binaire (TEB) en fonction de τ.

Les résultats montrent que les TEB sont inférieurs pour la modulation CWPM utilisant des ondelettes de Daubechies complexes en comparaison à ceux obtenus par la modulation WPM utilisant les ondelettes de Daubechies réelles.
En comparaison avec les résultats obtenus par la modulation OFDM, les TEB obtenus par la modulation CWPM sont encore supérieurs. Par contre, les résultats sont supérieurs à ceux de la modulation OFDM sans préfixe cyclique. Effet, c'est essentiellement l'utilisation d'un préfixe cyclique qui donne à la modulation OFDM des résultats intéressants en termes de TEB. Les performances de la modulation CWPM sont donc intéressantes seulement quand le préfixe cyclique n'est pas une solution utilisée, ceci correspond au cas où la réponse impulsionnelle du canal serait trop longue pour permettre une efficacité spectrale raisonnable avec un nombre de sous-canaux faible.

3.4 Performances de la WPM en fonction de l'effet Doppler

L'étude est réduite au canal dispersif en fréquence et non dispersif en temps. Le canal est donc composé d'un seul trajet d'amplitude variable en temps $\alpha[n]$. La variation du coefficient est paramétrée par la fréquence Doppler maximale f_d. En discret, le signal reçu s'exprime donc :

$$r[n] = \alpha[n]s[n]. \tag{7}$$

Les résultats en EQM en fonction de f_d sont présentés sur la figure 4.

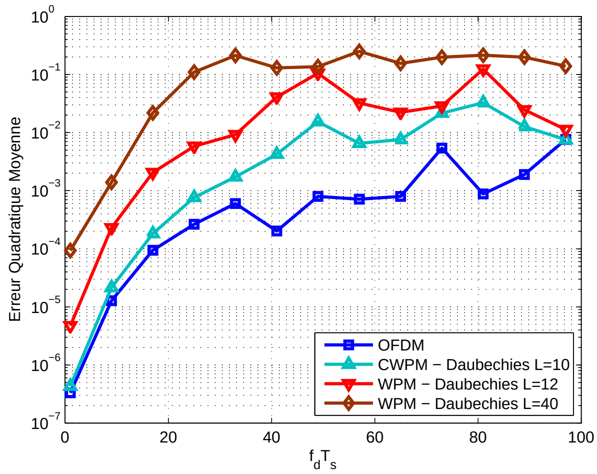

FIG. 4 – Erreur Quadratique Moyenne (EQM) en fonction de f_d.

Les résultats obtenus en présence d'un canal dispersif en fréquence vont dans le sens de la théorie [2]. En effet, les erreurs quadratiques des modulations WPM sont supérieures à celles de la modulation OFDM. Plus la dispersion fréquentielle de la forme d'onde utilisée est importante, plus la modulation est sensible à l'effet Doppler. Ainsi, l'ondelette de Daubechies réelle à L=40 coefficients est plus sensible que l'ondelette de Daubechies à L=12 coefficients, elle-même plus sensible que la fenêtre rectangulaire utilisée par la modulation OFDM. Nous remarquons également que, pour une complexité équivalente, l'ondelette de Daubechies complexe est plus robuste aux variations temporelles du canal que l'ondelette de Daubechies réelle.

4 Sensibilité aux non-linéarités de l'amplificateur de puissance

4.1 Contexte

Un inconvénient majeur [9] des modulations multiporteuses est la dynamique importante de l'enveloppe du signal temporel, caractérisée par la métrique PAPR (Peak-to-Average Power Ratio), exigeant à l'émission un amplificateur linéaire et donc peu efficace (rendement médiocre). Le PAPR est défini par :

$$PAPR = \frac{\max |s(t)|^2}{E_s}, \tag{8}$$

avec $E_s = E\left\{|s(t)|^2\right\}$ où $E\{.\}$ est l'opérateur de moyenne statistique.
Afin de diminuer les contrainte de linéarité de l'amplificateur, le PAPR peut être réduit par un choix approprié de la forme d'onde modulante.

4.2 Choix de la forme d'onde

Pour une modulation multiporteuses utilisant des formes d'ondes $\psi(t)$, nous montrons que le PAPR du signal transmis est borné par :

$$PAPR \leq M \max_{0 \leq t \leq T_s} |\psi(t)|^2, \tag{9}$$

avec $PAPR \leq M$ lorsque $\psi(t)$ est l'enveloppe rectangulaire utilisée par la modulation OFDM.
Afin de limiter le PAPR, une solution est d'utiliser des formes d'onde qui réduisent $\max |\psi(t)|^2$ sans diminuer E_s. Les paquets d'ondelettes permettent de limiter les fluctuations d'enveloppe du signal émis.

4.3 Performances de la WPM

Afin d'évaluer le PAPR de la modulation WPM, nous utilisons la Complementary Cumulative Density Function (CCDF) du PAPR. Cette fonction est définie par :

$$CCDF(PAPR_0) = Prob\,[PAPR > PAPR_0]. \tag{10}$$

La figure 5 donne les fonctions CCDF des signaux OFDM et WPM pour différentes ondelettes de Daubechies.

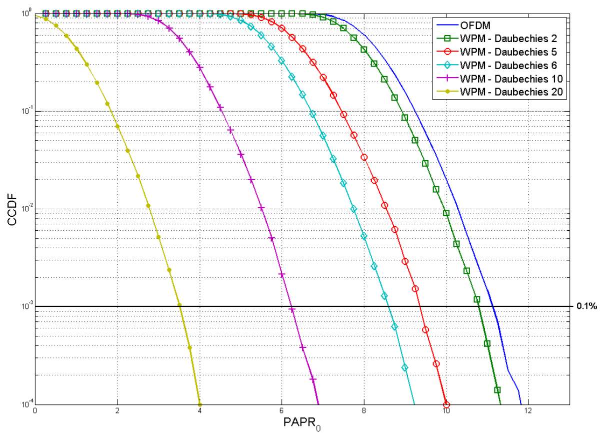

FIG. 5 – CCDF en fonction du PAPR.

Les résultats montrent que le signal OFDM a un PAPR qui excède 11.2 dB pour moins de 0.1% de la taille des données OFDM. Le PAPR à 0.1% de la modulation WPM est de 10.7 dB lorsque l'ondelette de Daubechies d'ordre 2 est employée et de 8.6 dB pour l'ondelette de Daubechies d'ordre 6, résultant une réduction du PAPR de 0.5 dB et 2.6 dB respectivement. Une réduction de 7.7 dB peut être atteinte avec l'ondelette de Daubechies d'ordre 20, ce résultat est très intéressant mais la complexité de ce système est nettement plus importante que celle de la modulation OFDM.

5 Conclusion

Afin de réduire les interférences d'une transmission sans-fil, une solution est d'utiliser de nouvelles formes d'ondes pour moduler l'information. Les travaux présentés dans cet article proposent l'utilisation des formes d'ondes par paquets d'ondelettes. Nous avons notamment défini des critères de choix de l'ondelette en fonction du contexte de transmission.
La modulation CWPM est la majeure contribution de cette étude, elle permet de limiter les interférences du canal multi-trajets. Cette étude permet également de mettre en valeur une caractéristique intéressante de la modulation WPM : la réduction significative du PAPR.
Nous avons ainsi réalisé une modulation multiporteuses reconfigurable efficace. En effet, les ondelettes offrent une flexibilité dans la conception du système et leur choix dépend de l'environnement de transmission.

Références

[1] S. Weinstein et P. Ebert. *Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform.* IEEE Transactions on Communications, Oct. 1971.

[2] R. Haas et J.C. Belfiore. *A Time-Frequency Well-localized Pulse for Multiple Carrier Transmission.* Wireless Personal Communications, 1997.

[3] M. Gautier. *Algorithmes et architectures de récepteurs pour les systèmes multi-porteuses par paquets d'ondelettes.* Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.

[4] Alan R. Lindsey. *Wavelet Packet Modulation for Orthogonally Multiplexed Communication.* IEEE Transactions on signal processing, mai 1997.

[5] I. Daubechies. *Ten Lectures on Wavelets.* Comm. Pure Appl. Math., SIAM, 1992.

[6] K. Liu, T. Kadouset et A.M. Sayeed. *Orthogonal Time-Frequency Signaling Over Doubly Dispersive Channels.* IEEE Transactions on Information Theory, nov. 2004.

[7] J-M Lina. *Complex daubechies wavelets : Filter design and applications.* ISAAC Conference, 1997.

[8] M. Gautier et J. Lienard. *Performances of complex wavelet packet based multicarrier transmission through double dispersive channel.* NORSIG 06 IEEE Nordic Signal Processing Symposium (Iceland), June 2006.

[9] R. van Nee et R. Prasad. *OFDM for Wireless Multimedia Communications.* Artech House edition, 2000.