



**HAL**  
open science

# Réduction des interférences entre sous-porteuses dans les systèmes OFDM fenêtrés sur canal acoustique sous-marin

Said Lmai, Arnaud Bourre, Christophe Laot, Sébastien Houcke

► **To cite this version:**

Said Lmai, Arnaud Bourre, Christophe Laot, Sébastien Houcke. Réduction des interférences entre sous-porteuses dans les systèmes OFDM fenêtrés sur canal acoustique sous-marin. GRETSI 2013 : 24ème colloque du Groupement de Recherche en Traitement du Signal et des Images, Sep 2013, Brest, France. hal-00935222

**HAL Id: hal-00935222**

**<https://hal.science/hal-00935222>**

Submitted on 11 Jun 2021

**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.

# Réduction des interférences entre sous-porteuses dans les systèmes OFDM fenêtrés sur canal acoustique sous-marin

Said LMAI, Arnaud BOURRÉ, Christophe LAOT, Sébastien HOUCKE

Institut Mines-Telecom, Telecom Bretagne, UMR CNRS 6285 Lab-STICC, Université Européenne de Bretagne,  
Technopôle Brest-Iroise CS83818 - 29238 Brest Cedex 3, France

said.lmai@telecom-bretagne.eu, arnaud.bourre@telecom-bretagne.eu  
christophe.laot@telecom-bretagne.eu, sebastien.houcke@telecom-bretagne.eu

**Thème** – Communications numériques

**Problème traité** – Sensibilité des schémas OFDM conventionnels dans les canaux fortement sélectifs en temps et en fréquence

**Originalité** – Proposition d'un schéma de fenêtrage OFDM équi-réparti entre l'émetteur et le récepteur

**Résultats** – Réduire les interférences entre sous-porteuses dues au décalage et étalement Doppler, éviter toute perte en  $E_b/N_o$  et implémenter un système qui fonctionne sans erreurs lors des expérimentations en mer

## 1 Contexte général

La transmission sur canal acoustique sous-marin (ASM) est difficile du moment qu'elle affronte de forts étalements temporels, de larges étalements Doppler avec une bande disponible réduite. De surcroît, les communications ASM sont large-bande de nature et l'effet Doppler dépend de la fréquence, à la différence des systèmes bande-étroite qui observent un décalage fréquentiel quasi-constant. Récemment, les communications ASM ont tiré profit de l'intérêt particulier apporté au schéma OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) [1–3]. Réputé pour sa simple implémentation en général, le système OFDM combat les interférences entre symboles (IES). Le schéma de transmission le plus répandu est le CP (cyclic prefix) OFDM.

Les systèmes OFDM conventionnels souffrent de certains inconvénients. La taille du CP pour le CP-OFDM ou l'intervalle de garde (IG) équivalent pour le ZP (zero-padded) OFDM, est souvent surdimensionnée, car l'estimation des statistiques du canal n'est pas précise (notamment pour des canaux fortement variants dans le temps tels que le canal ASM). Dès lors, en s'efforçant de maintenir une certaine valeur du BER (bit error rate), l'augmentation de la taille du CP conduit à une augmentation du SNR (signal-to-noise ratio) moyen par bit ( $E_b/N_o$ ). De plus, la modulation OFDM est sensible aux interférences entre sous-porteuses (ICI : inter-carrier interferences) qui émergent au niveau du récepteur, dues principalement à la mobilité émetteur/récepteur et à la variabilité du canal. Les schémas classiques ne sont pas robustes aux effets Doppler, et particulièrement dans les environnements large-bande. Parmi les techniques utilisées pour réduire les ICI, [4] a étudié le fenêtrage dans le contexte bande-étroite et sur canal gaussien. [2] a introduit son usage dans un système large-bande avec étalement Doppler. Les formes d'onde communément employées sont des fenêtres de Nyquist, où des zéros sont insérés de part et d'autre du signal OFDM utile avant d'appliquer le fenêtrage (nommé également apodisation). Toutefois, on peut utiliser CP-OFDM ou ZP-OFDM et l'apodisation peut être répartie sur le bloc émetteur et/ou sur le récepteur.

Dans ce papier, nous proposons un système particulier du CP-OFDM où le fenêtrage, appliqué dans le domaine temporel, est équi-réparti entre l'émission et la réception. Les performances sont évaluées par rapport aux modèles déjà abordés dans la littérature [2, 5, 6]. Contrairement aux schémas d'apodisation susmentionnés, il n'y a pas d'ajout de zéros sur les deux flancs du signal OFDM utile avant l'opération d'apodisation. Ainsi, l'efficacité spectrale affichée est plus intéressante.

## 2 Aperçu sur le modèle conceptuel du système

Notre système OFDM prend appui sur la fonction d'apodisation  $\sqrt{g(t)}$  implémentée à l'émission et à la réception. On note par Rect-OFDM le système CP-OFDM conventionnel avec une fenêtre porte, tandis que RRC-OFDM désigne le système OFDM apodisé avec la fenêtre en racine carrée du cosinus surélevé  $\sqrt{g(t)}$ .  $g(t)$  est une fenêtre temporelle de Nyquist à durée finie contrairement aux filtres usuels de Nyquist à support compact dans le domaine fréquentiel. La taille de  $\sqrt{g(t)}$  est exactement celle d'un symbole OFDM. Ainsi, l'opération d'apodisation est effectuée rigoureusement sur tout le symbole OFDM, CP inclus, de telle manière que la période de retombée correspond exactement à la taille du CP. De ce fait, la durée de IG est de  $\alpha T_o$ , où  $\alpha$  est le facteur de retombée de  $\sqrt{g(t)}$  et  $T_o$  est la durée du symbole OFDM utile (sans CP).

$$g(t) = \begin{cases} 1, & |t| < \frac{T_o(1-\alpha)}{2} \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{\alpha T_o} \left(|t| - \frac{T_o(1-\alpha)}{2}\right)\right) \right\}, & \frac{T_o(1-\alpha)}{2} \leq |t| < \frac{T_o(1+\alpha)}{2} \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (1)$$

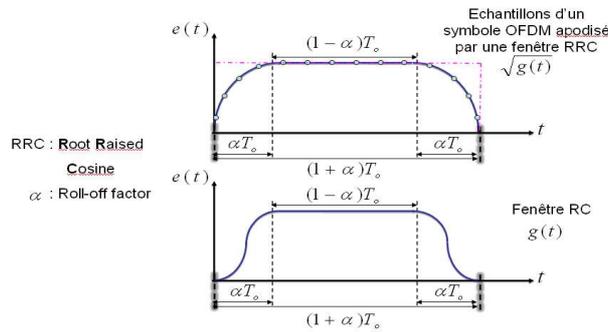


FIGURE 1 – Illustration de la fonction  $\sqrt{g(t)}$  appliquée sur un symbole OFDM

Les motivations initiales qui nous ont amenés à considérer le fenêtrage sont :

- sur un symbole CP-OFDM transmis, bien que le CP introduise une redondance dans le temps d'une partie de l'information originale, à l'égard du bruit, il sera affecté différemment. Ce qui défère en quelque sorte une certaine diversité, qu'il serait utile d'exploiter au niveau du module de réception ;
- pour un SNR moyen donné, l'apodisation réduit l'énergie, dans le domaine temporel, sur les bords du symbole OFDM ainsi conçu et permet de placer les IES dans des régions du signal ayant un SNR assez réduit ;
- l'implémentation du fenêtrage du côté du récepteur atténue davantage l'énergie des échantillons affectés par les IES. En effet, les coefficients de pondération de la fonction d'apodisation sont faibles sur les bords ;
- étant donné que la puissance moyenne des ICI dépend des amplitudes spectrales de la fonction  $g(t)$  [4], on note que le spectre en fréquence de la fonction d'apodisation utilisée a des lobes secondaires plus atténués que ceux du sinus cardinal ;
- en procédant par une augmentation progressive et lisse de l'amplitude du signal, l'apodisation permet d'éviter les changements violents constatés lorsque la fenêtre porte est d'usage dans le domaine temporel.

## 3 Résultats des simulations

Les paramètres relatifs aux simulations Monte Carlo conduites sont :  $N = 64$ , 128 sous-porteuses, modulation QPSK et au moins deux valeurs de CP. Le canal de Rayleigh à spectre Doppler de Jakes est utilisé avec un profil de puissance exponentiellement décroissant à 10 trajets. Aucun codage canal n'est employé.

### 3.1 L'influence de la taille du CP sur $E_b/N_o$

Le canal ASM introduit de larges réponses impulsionnelles qui contraignent de prendre des valeurs relativement grandes du CP. Les performances issues de la comparaison entre les systèmes Rect-OFDM et RRC-OFDM sont tracées en termes de BER en fonction de  $E_b/N_o$ . La borne théorique pour un canal de Rayleigh à un trajet est fournie comme référence. Dans la FIGURE 2, nous constatons que, au fur et à mesure que la taille du CP augmente les performances du Rect-OFDM se dégradent. Ainsi, allonger

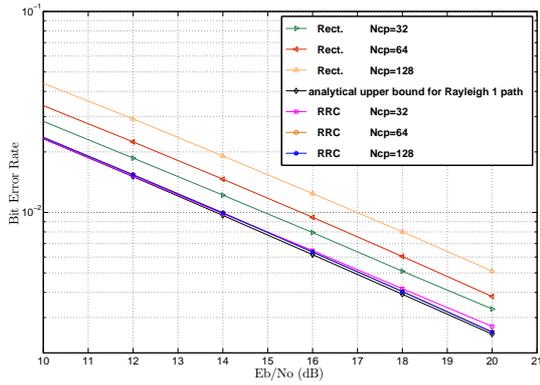


FIGURE 2 – Les performances BER du RRC-OFDM vs Rect-OFDM sur canal Rayleigh ( $N = 128$ ).

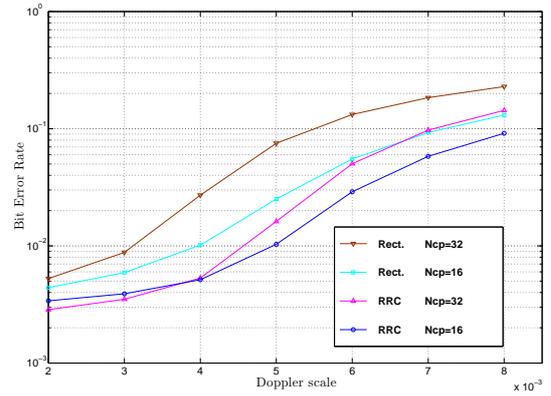


FIGURE 3 – Les performances BER pour  $E_b/N_o = 20 dB$ , contexte large-bande.

le CP conduit à perdre en  $E_b/N_o$ . En revanche, le RRC-OFDM préserve ses performances même si la taille du CP augmente et le gain par rapport au Rect-OFDM est supérieur à  $1dB$ . Mieux encore, la référence théorique est quasiment atteinte. D’où l’intérêt de notre schéma dans la préservation de  $E_b/N_o$  en plus des performances BER.

### 3.2 Contexte large-bande

L’effet Doppler peut être décrit par le facteur :  $\frac{v}{c}$ , désigné par ‘Doppler scale’, où  $v$  est la vitesse relative émetteur-récepteur et  $c$  est la célérité du son. Pour un  $E_b/N_o$  de  $20dB$ , les courbes de la FIGURE 3 montrent les performances BER en fonction du facteur Doppler qui varie dans une plage allant de  $2.10^{-3}$  à  $8.10^{-3}$ . Nous nous apercevons par exemple que le RRC-OFDM fait plus de quatre fois moins d’erreurs que le Rect-OFDM lorsque le facteur Doppler est de  $5.10^{-3}$  et  $N_{cp} = 32$ . Il est manifeste que le système proposé affiche des performances meilleures partout. Même par rapport aux schémas d’apodisation introduits dans la littérature, les performances sont plus intéressantes. Des résultats complémentaires seront fournis dans le papier final.

## 4 Résultats des expérimentations en mer

Le 13 juin 2012, nous avons mené des expérimentations dans les eaux peu profondes du port de Brest, afin de mettre à l’épreuve notre schéma. Un transducteur est utilisé à l’émission alors que la réception est faite sur deux hydrophones  $H1$  et  $H2$  à traitements distincts. Pour des supertrames de 48818 bits, nous avons essayé deux nombres de sous-porteuses :  $N = 120$  et  $240$ , et trois valeurs de IG :  $\alpha = 1/4, 1/3$  et  $1/2$ . Malgré l’intense activité dans le port qui introduit de fortes variations dans le canal et par conséquent la destruction de l’orthogonalité entre sous-porteuses, le système RRC-OFDM fonctionne sans erreurs.

## Références

- [1] S. Mason, C. Berger, S. Zhou, K. Ball, L. Freitag, and P. Willett, “An OFDM Design for Underwater Acoustic Channels with Doppler Spread”, in *Proc. 13th IEEE Digit. Signal Process. Workshop / 5th IEEE Signal Process. Edu. Workshop*, Marco Island, FL, pp. 138 -143, Jan. 2009.
- [2] Z. Wang, S. Zhou, G.B. Giannakis, C.R. Berger, and J. Huang, “Frequency-domain oversampling for zero-padded OFDM in underwater acoustic communications”, *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 37, no. 1, pp. 14 -24, Jan. 2012.
- [3] C.R. Berger, J. Gomes, and J.M.F. Moura, “Study of pilot designs for cyclic-prefix OFDM on time-varying and sparse underwater acoustic channels”, in *Proc. MTS/IEEE OCEANS Conf.*, Santander, Spain, June 2011.
- [4] P. Tan and N.C. Beaulieu, “Communication Theory Analysis of the effects of Nyquist pulse-shaping on the performance of OFDM systems with carrier frequency offset”, *Eur. Trans. Telecommun.*, vol. 20, no. 1, pp. 9–22, Jan. 2009.
- [5] N.C. Beaulieu and P. Tan, “Effect of transmitter Nyquist shaping on ICI reduction in OFDM systems with carrier frequency offset”, *IEE Electron. Lett.*, vol. 41, no. 13, pp. 746 – 748, June 2005.
- [6] N.C. Beaulieu and Peng Tan, “On the effects of receiver windowing on OFDM performance in the presence of carrier frequency offset”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 1, pp. 202 –209, Jan. 2007.