

CONCEPTION ET ÉVALUATION D'UN SYSTÈME OFDM SUR LE CANAL ACOUSTIQUE SOUS-MARIN PAR PETITS FONDS

Stéphane COATELAN, Alain GLAVIEUX

Département Signal et Communications
ENST-Br. - BP 832 - 29285 Brest Cedex

RÉSUMÉ

Dans cette article nous présentons un système de transmission multi-porteuses basé sur le principe de l'O.F.D.M utilisant un intervalle de garde et du codage convolutif avec entrelacement. Le canal acoustique sous-marin par petits fonds est d'une part, sélectif en fréquence (présence de trajets multiples) et d'autre part, non stationnaire (présence d'effet Doppler). En introduisant un intervalle de garde, il est possible de s'affranchir de l'interférence entre symboles ayant pour origine la sélectivité du canal. Les performances du système obtenues par simulations et lors de campagnes de mesures effectuées en mer ont montré la robustesse des choix effectués.

ABSTRACT

In this paper, we present a multicarrier transmission system based on the O.F.D.M principle using a guard interval and channel coding with interleaving. The shallow water acoustic channel is on the one hand, frequency selective (presence of multiple paths), and on the other hand, non stationary (presence of Doppler effect). By introducing a guard interval, intersymbol interference due to channel selectivity is avoided. The system performances obtained from simulations and from experiments carried out in the ocean have shown that the choices made are sound.

I. INTRODUCTION

La transmission de données sur le canal acoustique sous-marin possède de nombreux points communs avec les communications radio-mobiles. Le canal est sélectif en fréquence dans le sens où la propagation s'effectue suivant plusieurs trajets et est non stationnaire. Pour combattre la sélectivité du canal, une solution simple consiste à choisir des symboles dont la durée T est très supérieure à la dispersion temporelle maximale du canal notée τ_{\max} . En procédant ainsi, le canal risque de ne plus être stationnaire sur la durée des symboles et la démodulation peut s'avérer très délicate à réaliser. Une solution consiste à émettre des symboles de durée $T = \Delta + T_s$ où Δ est un intervalle de garde supérieur ou égal à τ_{\max} et à démoduler les symboles émis en observant le signal reçu sur une durée T_s , durée durant laquelle le canal est supposé stationnaire. La dispersion temporelle τ_{\max} du canal acoustique sous-marin étant relativement importante, pour atteindre un débit suffisant, nous utilisons un multiplex de N voies où chaque voie est modulée à deux états de fréquence (FSK).

II. SYSTÈME DE TRANSMISSION OFDM/FSK

A. Signal OFDM/FSK

En se plaçant sur l'intervalle $[kT, (k+1)T[$, le signal modulé en fréquence $e(t)$ est égal à :

$$e(t) = \Re_e \left\{ \sqrt{\frac{2E_b}{T}} \sum_{j=0}^{N-1} \exp i \left\{ 2\pi \left[F_o + j\Delta F + a_{kj}\Delta f \right] t + \varphi_j \right\} \right\} \quad (1)$$

où $\Delta F = \alpha/T_s$ est l'espacement en fréquence entre les voies du multiplex, $\Delta f = \beta/2T$, l'excursion en fréquence du modulateur FSK et β l'indice de modulation. a_{kj} est le symbole binaire à valeurs dans $\{-1, 1\}$ transmis sur la voie j du multiplex durant l'intervalle de temps $[kT, (k+1)T[$ et φ_j est une phase constante. La quantité $T = T_s + \Delta$ est la durée d'un symbole OFDM/FSK, Δ étant l'intervalle de garde et T_s la durée d'observation en réception. E_b est l'énergie utilisée pour transmettre un symbole binaire et F_o la fréquence basse du multiplex. Les signaux émis sur les N voies du multiplex étant orthogonaux, les paramètres α et β présents dans les expressions de ΔF et Δf sont des entiers et vérifient l'inégalité suivante :

$$\alpha \geq 2\beta \quad \text{avec} \quad \alpha, \beta \in \mathbb{N} \quad (2)$$

B. Performances en terme de probabilité d'erreur

Pour un canal de Rayleigh, on peut montrer que la probabilité d'erreur du système OFDM/FSK est égale à :

$$P_e = \frac{1}{2 + \frac{E_b T_s}{N_o T}} \quad (3)$$

L'utilisation en réception d'une durée d'observation T_s différente de la durée symbole T pour démoduler les symboles OFDM/FSK permet de s'affranchir de l'interférence intersymboles ayant pour origine la sélectivité en fréquence du canal.



Malheureusement cette façon de procéder entraîne une dégradation de la probabilité d'erreur P_e ainsi que de l'efficacité spectrale de la transmission qui est d'autant plus importante que le rapport T_s/T est petit. Or pour le canal acoustique sous-marin horizontal par petits fonds, les valeurs numériques de τ_{\max} et du Doppler maximal noté F_d conduisent généralement à choisir ce rapport petit devant l'unité. Il s'en suit alors une dégradation du rapport signal à bruit et de l'efficacité spectrale égale à $10 \log T_s/T$.

C. Sensibilité du système OFDM/FSK au dimensionnement de l'intervalle de garde

En présence d'interférence intersymboles introduite par un mauvais dimensionnement de l'intervalle de garde ($\Delta < \tau_{\max}$), les conditions d'orthogonalité entre les signaux des différentes voies du multiplex ne sont plus respectées. Il s'en suit alors une dégradation des performances du système de transmission en terme de taux d'erreur binaire (TEB) que nous avons quantifiée à partir de simulations. Pour ces simulations, nous avons considéré un canal de Rayleigh à plusieurs trajets dont la dispersion temporelle est supérieure à l'intervalle de garde (rapport Δ / τ_{\max} inférieur à l'unité). Comme on peut le voir sur la figure 1, les performances du système OFDM/FSK se dégradent rapidement pour des rapports $\Delta / \tau_{\max} < 0,9$. Il est donc impératif de bien dimensionner l'intervalle de garde en veillant toutefois à ne pas trop le sur dimensionner, ce qui conduirait aussi à une dégradation des performances de la transmission par le biais du rapport T_s/T .

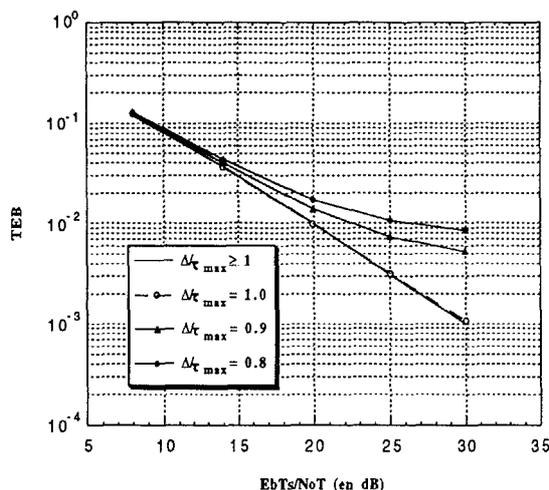


Figure 1 Taux d'erreur binaire en fonction du rapport $E_b T_s / N_o T$ sur un canal de Rayleigh sélectif en fréquence avec $P_0=0,6$, $P_1=0,2$, $P_2=0,1$, $P_3=0,085$, $P_4=0,015$ (t_0, t_1, t_2 et $t_3 < \Delta$; $t_4 > \Delta$) et $\Delta F=2/T_s$ - $\Delta f=1/2T_s$ - $N=20$ - $F_d T_s=0,01$

D. Sensibilité du système OFDM/FSK à l'effet Doppler

L'intervalle de garde étant bien dimensionné ($\Delta \geq \tau_{\max}$), seule la diaphonie entre les différentes voies du multiplex peut affecter les performances du système de transmission. De manière à

assurer l'absence de diaphonie en présence d'effet Doppler F_d , le canal doit évoluer lentement vis à vis de la durée d'observation T_s du récepteur. Cette condition se traduit par :

$$F_d T_s \ll 1 \quad (4)$$

Pour évaluer la sensibilité du système OFDM/FSK vis à vis du Doppler normalisé $F_d T_s$, nous avons évalué par simulations le taux d'erreur binaire sur un canal de Rayleigh sélectif en fréquence en fonction du rapport $E_b T_s / N_o T$ et pour différentes valeurs du produit $F_d T_s$. Les résultats des simulations sont présentés sur la figure 2 avec un espacement entre les voies du multiplex de $\Delta F = 2 / T_s$.

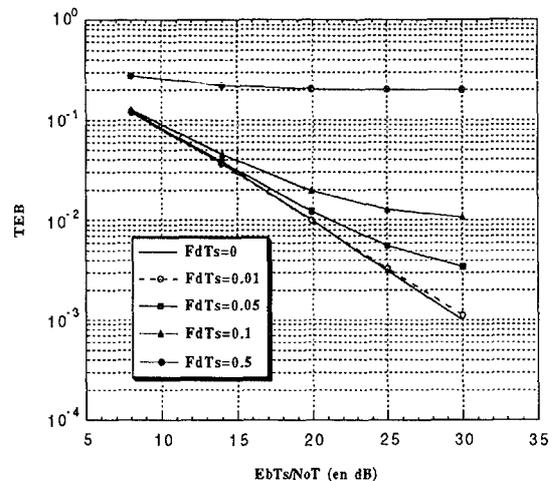


Figure 2 Taux d'erreur binaire en fonction du rapport $E_b T_s / N_o T$ pour différentes valeurs du Doppler sur un canal de Rayleigh sélectif en fréquence avec $P_0=P_1=P_2=P_3=P_4=1/5$ et $\Delta F=2/T_s$ - $\Delta f=1/2T_s$ - $N=20$

Pour un écartement de $\Delta F = 2 / T_s$, la dégradation du taux d'erreur binaire est peu perceptible pour un produit $F_d T_s$ inférieur à 0,02. Nous avons vérifié que lorsque l'on écarte les voies du multiplex (augmentation de ΔF), les effets de la diaphonie se font moins ressentir mais l'efficacité spectrale se dégrade. Enfin, même en écartant suffisamment les voies du multiplex, pour $F_d T_s$ supérieur à 0,05, on observe une dégradation importante des performances du système OFDM/FSK. Ceci est dû à la diaphonie qui devient trop importante entre les voies en phase et en quadrature du récepteur non cohérent.

III. CODAGE DE CANAL

A. Intérêt

Si le système de transmission étudié permet de s'affranchir de l'interférence intersymboles due à la présence de trajets multiples, il ne supprime en aucun cas les erreurs dues aux évanouissements sur le canal. L'introduction de codage de canal est donc une

solution possible pour améliorer les performances du système de transmission.

B. Borne supérieure de la probabilité d'erreur

En présence de codage de canal de type convolutif de rendement $R = b/n$, la probabilité d'erreur P_{ec} après décodage à décision pondérée, peut être bornée par [1] :

$$P_{ec} \leq \frac{1}{b} \sum_{d=df}^{\infty} W(d)P(d) \quad (5)$$

où $P(d)$ est la probabilité de décoder une séquence binaire à la distance d de la séquence émise, df est la distance libre du code et $W(d)$ sont des coefficients caractéristiques du code utilisé qui peuvent se calculer à partir de sa fonction de transfert [2].

Pour un canal de Rayleigh non sélectif en fréquence (absence d'interférence intersymboles et décorrélation des informations à l'entrée du décodeur), la probabilité $P(d)$ est égale à :

$$P(d) = \sum_{k=0}^{d-1} C_{k+d-1}^k \frac{\gamma^k}{(1+\gamma)^{k+d}} \quad (7)$$

avec

$$\gamma = 1 + \frac{E_{bc} T_s}{N_o T} \quad (8)$$

et E_{bc} est l'énergie utilisée pour transmettre un symbole ($E_{bc} = RE_b$).

C. Dimensionnement de la matrice d'entrelacement

Pour décorréler les informations présentes à l'entrée du décodeur de canal, nous avons utilisé la technique de l'entrelacement. Cette fonction est réalisée à partir d'une matrice dont les dimensions jouent un rôle important sur les performances du décodeur. Pour déterminer les dimensions optimales de cette matrice, nous avons réalisé des simulations sur un canal de Rayleigh sélectif en fréquence. Dans les simulations nous utilisons un code convolutif de rendement $R = 1/2$ et de longueur de contrainte $K = 7$ et de polynômes générateurs $G^1 = 133$ et $G^2 = 171$. La matrice d'entrelacement est une matrice carrée avec écriture suivant les lignes et lecture suivant les colonnes.

Lorsque le canal évolue rapidement ($FdTs > 0,05$), les évanouissements sont de faible durée, les paquets d'erreurs sont courts et la matrice d'entrelacement est a priori de faible dimension. Notons toutefois que dans ce cas de figure, les propriétés d'orthogonalité entre les signaux des N voies du multiplex n'étant plus respectées, des erreurs peuvent apparaître en nombre important.

Lorsque le canal évolue lentement ($FdTs \leq 0,05$), les évanouissements durent longtemps et la matrice d'entrelacement doit être suffisamment bien dimensionnée pour casser les paquets d'erreurs, a priori de grande longueur à l'entrée du décodeur. Les résultats des simulations menées pour un Doppler normalisé de

$FdTs = 0,05$ sont présentés sur la figure 3. Le gain de codage sans entrelacement pour un TEB de 10^{-3} est supérieur à 18 dB. Le codage convolutif (133/171) est donc efficace pour corriger les erreurs dues à la sélectivité en fréquence du canal. En ajoutant une matrice d'entrelacement de taille 64×64 on obtient un gain supplémentaire de 1 dB en considérant le même TEB de 10^{-3} . La courbe du TEB obtenue avec une matrice d'entrelacement de taille 64×64 tangente la borne supérieure de la probabilité d'erreur pour un rapport signal à bruit supérieur à 12 dB. Ceci montre que la matrice d'entrelacement choisie est bien dimensionnée.

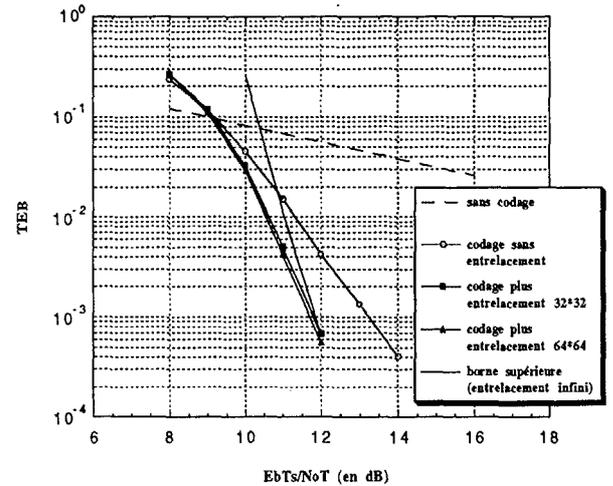


Figure 3 Taux d'erreur en fonction du rapport $E_b T_s / N_o T$ sur un canal de Rayleigh sélectif en fréquence avec $P_0 = P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 1/5$, Doppler $F_d T_s = 0,05$ ($\Delta F = 2/T_s - \Delta f = 1/2T_s - N = 16$)

IV. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

A. Présentation

Plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées par l'Ifremer en collaboration avec Télécom Bretagne. Une journée de mesures consistait à effectuer plusieurs enregistrements de signaux OFDM/FSK en fonction de la nature du fond, de la hauteur d'eau et de la distance de transmission.

La partie émission de la chaîne de transmission, constituée de l'émetteur de signaux OFDM/FSK, d'un amplificateur de puissance et d'un transducteur omnidirectionnel se trouvait sur le bateau. La partie réception, constituée d'un hydrophone et d'un caisson étanche contenant un pré-ampli et un enregistreur DAT, était immergée sur le site. Le dispositif en réception, préalablement programmé, enregistrait à heures fixes les signaux émis depuis le bateau. La chaîne expérimentale de transmission est illustrée sur la figure 4.

Pour chaque configuration de transmission, nous avons d'une part estimé les paramètres du canal : nombre, amplitude et dispersion des trajets principaux, évolution temporelle du canal (effet Doppler), et déterminé le rapport signal à bruit moyen ainsi que le taux d'erreur binaire de la transmission.

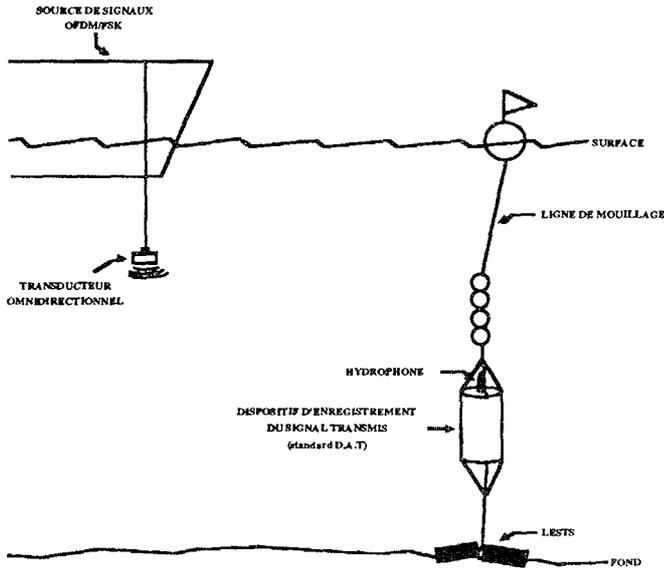


Figure 4 Chaîne expérimentale de transmission

B. Analyse de la réponse impulsionnelle du canal

La nature du fond, la profondeur d'eau et la distance de transmission ont une influence sur la réponse impulsionnelle du canal. Dans le paragraphe (II.C), nous avons montré que les performances du système de transmission se dégradent rapidement si les trajets dont l'instant d'arrivée excèdent l'intervalle de garde, sont énergétiques. Dans la majorité des cas de figures rencontrés lors des campagnes de mesures en mer, la dispersion temporelle du canal est inférieure à 30 ms ce qui justifie le choix d'un intervalle de garde de 30 ms.

C. Résultats de transmission sur le canal acoustique sous-marin par petits fonds

Les premiers essais en mer ont permis d'une part, de vérifier la robustesse du système de transmission proposé et d'autre part, d'avoir une meilleure connaissance de ce type de canal, permettant ainsi de mieux dimensionner les paramètres du système de transmission.

Nous allons maintenant présenter quelques résultats obtenus lors des essais en mer et qui sont regroupés dans la table 1. Pour chaque configuration de transmission, nous donnons le taux d'erreur binaire (TEB) et le rapport signal à bruit moyen ($E_b T_s / N_o T$) estimé pour un multiplex de $N = 10$ voies avec un écartement entre voies $\Delta F = 4/T_s$. Avec un intervalle de garde Δ de 30 ms et une durée d'observation en réception T_s de 10 ms, la durée symbole T est de 40 ms et le débit numérique du multiplex est de 250 bit/s.

La première remarque que nous pouvons faire est que dans la majorité des configurations testées, il a été possible de démoduler les signaux OFDM/FSK. Ce résultat est bien entendu très encourageant ainsi que les performances obtenues qui se situent autour de $4 \cdot 10^{-2}$ après démodulation.

Par contre, il y a peu d'erreurs après décodage car le nombre de bits émis est insuffisant pour les rapports signaux à bruit utilisés.

Il est donc difficile de donner une valeur fiable du taux d'erreur après décodage. De prochains essais en mer avec des séquences plus longues permettront de valider ces taux d'erreur.

Distance de transmission (m)	Profondeur (m)	Type de fond	Bits émis	TEB après démodulation	TEB après décodage	Erreurs après décodage	SNR moyen estimé (dB)
1040	27	vase	18500	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$< 1 \cdot 10^{-3}$	0	24
1920	27	sable	18500	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$< 1 \cdot 10^{-3}$	0	16
3780	30	gravier	18600	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	32	10,5
175	83	vase	18500	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$< 1 \cdot 10^{-3}$	0	19
445	85	vase	18500	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$< 1 \cdot 10^{-3}$	0	17,8
1110	87	vase	18500	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	12	12,5
315	36	sable	18500	$8,8 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	11	12
535	35	sable	18500	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$< 1 \cdot 10^{-3}$	0	13,8
2130	34	roche	18600	$7,6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	46	11

Table 1 Performances de transmission pour 9 stations de mesures

V. CONCLUSION

Les performances du système OFDM/FSK obtenues par simulations montre la robustesse des choix effectués lorsque l'intervalle de garde est bien dimensionné c'est-à-dire quand Δ/τ_{\max} est supérieur à 0,9 pour un Doppler normalisé $F_d T_s$ inférieur à $5 \cdot 10^{-2}$. Des essais en mer ont permis d'obtenir un taux d'erreur moyen après démodulation de $4 \cdot 10^{-2}$ et de mieux dimensionner les paramètres du système de transmission. De prochains essais vont permettre de valider le taux d'erreur après décodage grâce à l'implémentation de l'émetteur sur processeur de signal incluant les fonctions de codage convolutif (133/171) et d'entrelacement (64*64).

VI. BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.G. Proakis, *Digital Communications 2nd édition*. New York, Mc Graw - Hill, 1989.
- [2] Bhargava - Haccoun - Matyas - Nuspl, *Digital communications by Satellite*, A. Wiley - Interscience publication, 1981.