

# Estimation et compensation du Doppler par porteuses pilotes en communication ASM en présence de trajets multiples pour signaux CP-OFDM

Bastien LYONNET<sup>1</sup>, Cyrille SICLET<sup>1</sup>, Jean-Marc BROSSIER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> : GIPSA-Lab (Grenoble Images Parole Signal Automatique, UMR 5216), CNRS, FRANCE, [bastien.lyonnet@gipsa-lab.grenoble-inp.fr](mailto:bastien.lyonnet@gipsa-lab.grenoble-inp.fr)

Grenoble

Images

Parole

Signal

Automatique

## Problématique :

- ✓ Les canaux acoustiques sous-marins sont particulièrement sélectifs en fréquence  
⇒ Développement de l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) en milieu sous-marin, modulation développée depuis une trentaine d'années dans les communications filaires (ADSL) et communications radio (Wifi IEEE 802.11 a/g/n, TNT en particulier). Modulation robuste vis-à-vis des canaux sélectifs en fréquence.
- ✓ Effet Doppler important en milieu sous-marin : un déplacement de quelques mètres par seconde suffit pour introduire un décalage fréquentiel, mais aussi une dilatation temporelle significative des signaux.  
⇒ Les modulations multiporteuses ont une importante sensibilité à l'effet Doppler.
- ✓ Cet article se concentre sur une méthode d'estimation et de compensation Doppler en milieu sous-marin en considérant connue une partie des symboles émis (pilotes) sur des fréquences porteuses prédéterminées.

## Signal en réception :

- ✓ L'effet Doppler modifie en réception la fréquence centrale du signal, et provoque une dilatation ou une compression temporelle sur chaque trajet. L'orthogonalité entre porteuses OFDM est perdue. Le décalage fréquentiel peut être supérieur à l'écart inter-porteuse. La bande occupée par le signal reçu peut être supérieure à  $MF_0$ . On peut donc avoir du recouvrement spectral après échantillonnage à la période  $T_r$ . Pour éviter cela, on suréchantillonne d'un facteur 2 ( $\frac{1}{T_r} = 2MF_0$ ).

- ✓ Ecriture matricielle du signal reçu en bande de base pour  $K$  échantillons :

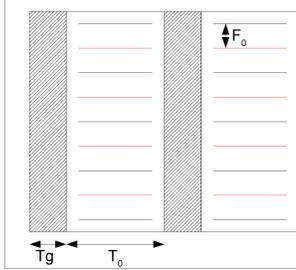
$$\mathbf{r} = \mathbf{f}_d \mathbf{c}_h + \mathbf{b} \quad (3)$$

$$\mathbf{c}_h = (c[m]h[m])_{0 \leq m \leq M-1} \quad \text{avec } h[m] = \sum_{l=1}^L A_l e^{-2\pi j f_0 \tau_l} e^{-j2\pi m F_0 \tau_l}$$

$$\mathbf{f}_\delta = (e^{j2\pi k T_r (\delta m F_0 + (\delta-1) f_0)})_{0 \leq k \leq K-1, 0 \leq m \leq M-1} \quad \mathbf{b} = (b(kT_r))_{0 \leq k \leq K-1}$$

## I. Le signal CP-OFDM

fréquence



- ✓ Utilisation en parallèle de  $M$  porteuses orthogonales. Partition du canal large bande en  $M$  canaux à bande étroite non sélectifs. Les fréquences porteuses sont choisies de manière à être régulièrement espacées d'un espace inter-porteuse  $F_0 = \frac{1}{T_0}$ .

- ✓ Durée utile  $T_0$  suffisamment petite pour considérer un effet Doppler constant sur un symbole.

- ✓ Intervalle de garde  $T_g$  suffisamment grand pour que chaque symbole temporel OFDM reçu soit indépendant des autres malgré les retards des trajets multiples induits par le canal [1] (chapitre 11).

Représentation temps fréquence d'un signal OFDM.

- ✓  $\mathbf{V}$  : l'ensemble des indices des porteuses, dont  $M_p$  porteuses pilotes avec  $\mathbf{V}_p$  l'ensemble des indices de ces porteuses et  $\mathbf{V}_i$  l'ensemble des indices des porteuses d'information.

- ✓ Pour  $-T_g - T_0/2 \leq t \leq T_0/2$ , le signal CP-OFDM en bande de base s'écrit :

$$s(t) = \sum_{m \in \mathbf{V}_p} c[m] e^{j2\pi m F_0 t} + \sum_{m \in \mathbf{V}_i} c[m] e^{j2\pi m F_0 t} \quad (1)$$

avec  $c[m]$  les symboles QAM transmis.

- ✓ Le signal réel sur onde porteuse s'écrit :  $s_{\text{HF}}(t) = \Re\{s(t)e^{j2\pi f_0 t}\}$

- ✓ Les signaux considérés ont une largeur de bande de 7.5kHz, et une fréquence centrale de l'ordre de  $f_0 = 15\text{kHz}$ .

## II. Canal sous-marin

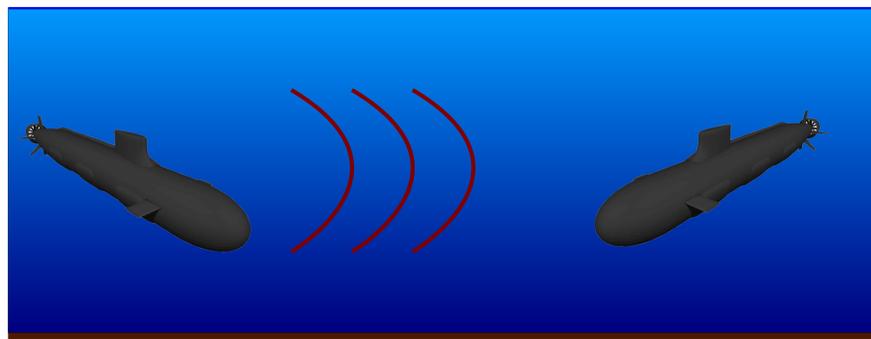


Schéma du problème considéré.

- ✓ Milieu petits fonds : la distance émetteur/récepteur est considérée proche du kilomètre et la profondeur de l'ordre de 100 mètres. Présence de nombreux trajets multiples qui dégradent les performances de décodage du signal reçu.

- ✓ Un modèle de propagation en rayons nous permet d'exprimer le signal reçu en bande de base, [2].

$$r(t) = \sum_{l=1}^L A_l e^{-2\pi j f_0 \tau_l} s(dt - \tau_l) e^{j2\pi f_0 (d-1)t} + b(t) \quad (2)$$

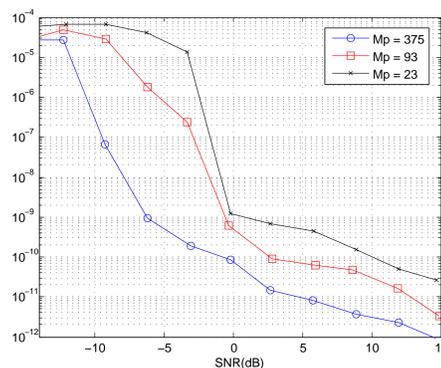
$A_l$  amplitude du trajets  $l$ , de retard initial  $\tau_l$  ( $1 \leq l \leq L$ ).

- ✓ Le bruit en bande de base  $b(t)$  est supposé blanc dans la bande du signal, gaussien, de densité spectrale de puissance bilatérale  $\frac{N_0}{2}$ .

- ✓  $d = 1 - v \cos(\theta)/c$ . Avec  $\theta$  l'angle entre la direction de déplacement et la direction émetteur/récepteur,  $v$  la vitesse de l'émetteur,  $c$  la vitesse des ondes acoustiques dans l'eau. On néglige l'influence des courants sous-marins. Le paramètre Doppler est inchangé sur la durée d'un symbole. L'effet Doppler est le même sur tous les trajets. Considérant un temps de cohérence du canal de quelques secondes, on choisit  $T_0 = 200\text{ms}$ .

- ✓ L'intervalle de garde étant suffisamment long ( $T_g = 50\text{ms}$ ) les symboles CP-OFDM peuvent être considérés indépendamment les uns des autres.

## III. Estimation par porteuses nulles du paramètre Doppler



- ✓  $c[m] = 0, \forall m \in \mathbf{V}_p$

- ✓ Si les  $M$  colonnes de la matrice  $\mathbf{f}_\delta$  forment une famille libre, la matrice  $\mathbf{G}(\delta) = \mathbf{f}_\delta^H \mathbf{f}_\delta$  est une matrice de Gram définie positive, donc inversible.

- ✓ D'après (3), on a alors :

$$\mathbf{c}_h \approx \hat{\mathbf{c}}_h = (\mathbf{f}_\delta^H \mathbf{f}_\delta)^{-1} \mathbf{f}_\delta^H \mathbf{r} \quad (4)$$

Équation résolue au sens des moindres carrés.

- ✓ On en déduit l'estimateur en cherchant à minimiser l'énergie sur les porteuses nulles.

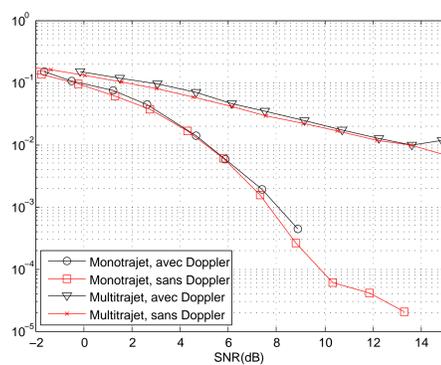
Variance de l'estimateur du paramètre Doppler pour différents nombres de porteuses inutilisées.  $d = 1.0027$ .

$$\hat{d} = \arg \min_{\delta} \sum_{m \in \mathbf{V}_p} \left| \left[ (\mathbf{f}_\delta^H \mathbf{f}_\delta)^{-1} \mathbf{f}_\delta^H \mathbf{r} \right] [m] \right|^2 \quad (5)$$

- ✓ Simulations faites sur un symbole CP-OFDM, durée utile  $T_0 = 200\text{ms}$ ,  $M = 1500$  sous-porteuses, écart inter-porteuses de 5Hz avec une fréquence centrale de 15kHz. Le paramètre Doppler est le même pour chaque trajet et fixé à  $d = 1.0027$ , soit une vitesse de 5.6 m/s. Distance émetteur/récepteur de 1km, la profondeur à 100 mètres. Paramètres du canal donnés par un modèle géométrique en rayons. Les éléments transmis sont de type QPSK. Résultats à comparer à ceux de [3]

- ✓ La variance de l'estimateur est à comparer à la variance minimale garantissant un décalage fréquentiel inférieur à l'écart interporteuse  $F_0$ ; ici  $\text{Var}(\hat{d}) < 3.10^{-8}$ .

## IV. Compensation et égalisation



- ✓ Une fois le paramètre Doppler estimé, l'équation (3) nous permet de récupérer les éléments transmis mais affectés par les trajets multiples du canal. Si on considère les paramètres  $\tau_l$  connus, il est possible d'effectuer une égalisation à un coefficient par sous-porteuse grâce à la présence du préfixe cyclique.

- ✓ la variable estimée  $\hat{\mathbf{c}}_h$  suit une loi normale de moyenne  $\mathbf{c}_h$  et de matrice d'autocorrélation  $\mathbf{f}_\delta^H \mathbf{f}_\delta \sigma_b^2$

$$\hat{\mathbf{c}}_h \sim \mathcal{N}(\mathbf{c}_h, \mathbf{f}_\delta^H \mathbf{f}_\delta \sigma_b^2) \quad (6)$$

Taux d'erreur binaire après compensation Doppler et égalisation. Estimation du Doppler par porteuses nulles.

- ✓ Les  $M$  colonnes de la matrice  $\mathbf{f}_\delta$  forment bien une famille libre pour peu que  $F_0 T_r \delta < 1/M$  ce qui est bien assuré si on suréchantillonne le signal en réception.

- ✓ Par ailleurs, si  $\delta = d = 1$  et  $T_r = \frac{1}{MF_0}$ , on retrouve le cas sans Doppler pour lequel  $\mathbf{f}_\delta^H = \mathbf{f}_\delta^{-1}$  avec  $M = K$ .

- ✓ Pour les simulations, la valeur du paramètre Doppler est celle obtenue par l'estimateur par porteuses nulles. Le nombre de porteuses nulles est de 375. Avec ou sans trajets multiples, les performances avec effet Doppler sont très proches de celles sans effet Doppler, ceci grâce aux bonnes performances de l'estimateur.

## Références

- [1] John G. Proakis, *Digital communications* / John G. Proakis, McGraw-Hill, New York :, 1983.
- [2] Walter Munk, "Ocean acoustic tomography," in *Physical Oceanography*, Markus Jochum and Raghu Murtugudde, Eds., pp. 119-138. Springer New York, 2006, 10.1007/0-387-33152-28.
- [3] B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, and L. Freitag, "Pilot-tone based ZP-OFDM demodulation for an underwater acoustic channel," in *OCEANS 2006*, sept 2006, pp. 1-5.