

## CARACTERISATION DU CANAL ACOUSTIQUE SOUS-MARIN REEL A L'AIDE D'UN ALGORITHME DE SYNTONISATION DES PICS INTERFERANTS

Hubert MARIOTTE

Pierre Yves COCHET

Département Signal et Communications  
ENST - Br. BP 832 - 29285 Brest - FRANCE  
Téléphone : (33) 98.00.11.11  
Fax : (33) 98.00.10.98

RÉSUMÉ

ABSTRACT

La mise au point d'un système de communications numériques nécessite la connaissance en temps réel des contraintes apportées par le canal de transmission sur ce système. Dans cet article, nous nous intéressons tout particulièrement à l'étude de ces contraintes dans le cas du canal acoustique sous-marin par petits fonds. Ce canal est caractéristique du fait de sa sélectivité en fréquence et de sa non-stationnarité. Le but de cet article est de présenter un nouvel algorithme d'estimation des paramètres de propagation dans un canal sélectif et non stationnaire tel que le canal acoustique sous-marin horizontal.

The perfection of a digital communication system requires the real time knowledge of the constraints imposed by the transmission channel on this system. In this paper, we are concerned especially by the study of these constraints in the case of a shallow water acoustic channel. This channel is characterized by its selectivity and its non stationarity. The goal of this paper is to present a new estimation algorithm of propagation parameters in a selective and non stationary channel, such as the acoustic underwater channel.

### 1. INTRODUCTION

Le canal acoustique sous-marin est probablement l'un des environnements les plus hostiles pour la transmission de données. Les caractéristiques de ce canal qui comprend de l'atténuation, des trajets multiples donc de la sélectivité fréquentielle et du décalage Doppler ne permet pas l'application directe des techniques classiques de communications. Cependant, il existe de nombreuses situations dans lesquelles il est souhaitable de communiquer dans le milieu marin. Dans le but de transmettre des données, une première étape est de caractériser le canal acoustique sous-marin.

Dans la première partie, nous présentons le signal utilisé pour la caractérisation du canal.

Dans la seconde partie, nous détaillons l'algorithme de syntonisation des pics interférants. Cet algorithme itératif nécessite une estimation initiale des différents paramètres du canal. Les propriétés de corrélation des séquences binaires à longueur maximale associées avec un banc d'oscillateurs nous permettent d'obtenir ces estimations initiales. Puis, les paramètres sont fournis à l'algorithme qui suit les évolutions dans le temps des différents paramètres.

Dans la troisième partie, nous présentons quelques résultats obtenus dans le cas de signaux réels enregistrés en mer.

Nous concluons sur les utilisations possibles de cet algorithme.

### 2. SIGNAL UTILISE

#### 2.1. Signal émis

Nous considérons des signaux à modulation de phase à deux états, de fréquence porteuse  $f_0$ , modulés par des séquences binaires à longueur maximale au rythme de  $\frac{f_0}{6}$  Kbits/s (fig. 1).

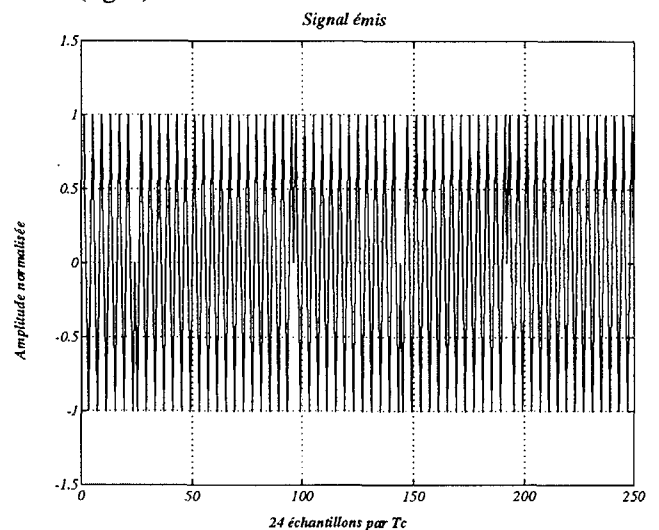


fig. 1 : Signal émis

#### 2.2. Signal reçu

Si on considère qu'il y a une propagation par trajets multiples avec pour chaque trajet une atténuation, un retard et un décalage Doppler, le signal reçu est constitué



d'une suite d'échos et a la forme suivante :

$$r(t) = \sum_{k=1}^N \alpha_k s(t - \tau_k) \cos[2\pi(f_0 + f_{dk})(t - \tau_k)] + b(t) \quad (1)$$

où

$s(t)$  : séquence émise (longueur maximale)

$f_0$  : fréquence porteuse

$N$  : nombre d'échos

$\alpha_k$  : atténuation du  $k^{\text{ième}}$  écho

$\tau_k$  : retard du  $k^{\text{ième}}$  écho

$f_{dk}$  : décalage Doppler du  $k^{\text{ième}}$  écho

$b(t)$  : bruit

Sur la figure suivante, nous donnons un exemple d'un signal reçu simulé comprenant deux échos et avec un rapport signal sur bruit de 15 dB.

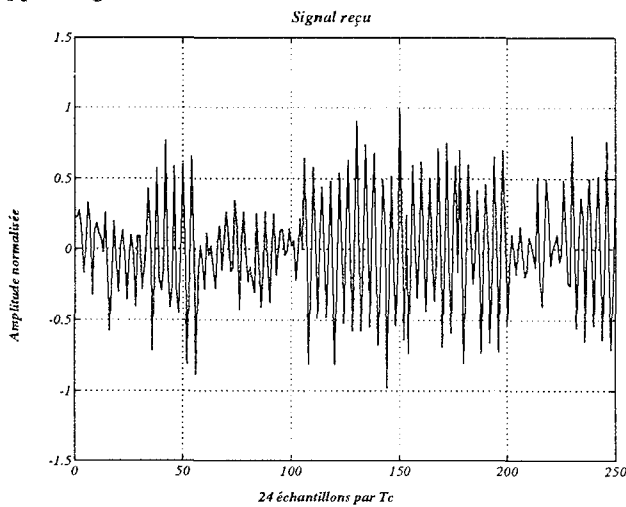


fig. 2 : Signal reçu(simulé)

### 3. ALGORITHME DE SYNTONISATION DES PICS INTERFERANTS

#### 3.1. Introduction

Cet algorithme est basé sur l'algorithme EM, initialement proposé par [1]. L'utilisation de cet algorithme pour l'estimation de paramètres a été présentée par [2], [3]. La nouvelle approche est de prendre en compte l'estimation du décalage Doppler de chaque trajet. Cependant, cet algorithme est très sensible à l'estimation initiale des paramètres.

#### 3.2. Estimation initiale des paramètres

L'estimation de ces paramètres est faite à l'aide des propriétés de corrélation des séquences binaires à longueur maximale [4]. Le signal reçu en bande de base est passé à travers un banc d'oscillateurs (fig. 3) dont la fréquence est liée à la longueur de la séquence émise  $N_c$  et à la durée symbole  $T_c$  d'après la relation suivante :

$$f_0 + \Delta f_i \text{ avec } \Delta f_i \in \left[ -\frac{1}{N_c T_c} \text{ Hz}, \frac{1}{N_c T_c} \text{ Hz} \right] \quad (2)$$

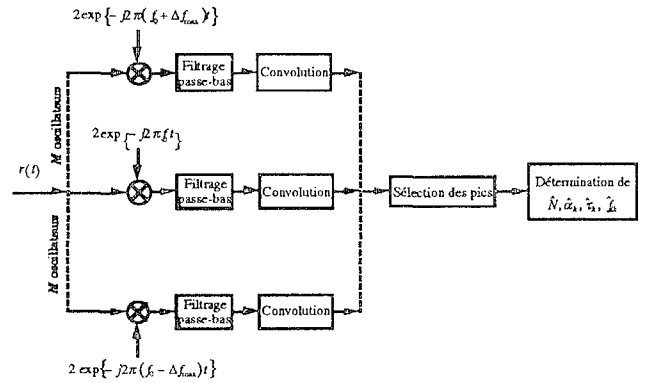


fig. 3 : Banc d'oscillateurs et de corrélateurs (B.O.C.)

Le signal est multiplié sur chaque branche par un oscillateur dont la fréquence est  $f_0 + \Delta f_i$ . Puis, nous le filtrons de façon à le ramener en bande de base. Comme  $s(t)$  est une séquence à longueur maximale, la corrélation entre chaque signal en bande de base et  $s(t)$  nous donne sur chaque branche une succession de pics. Après la sélection des pics, le nombre  $\hat{N}$  est le nombre estimé d'échos et pour chaque écho nous sélectionnons le plus grand pic à un temps fixé pour déterminer l'atténuation, le retard et le décalage Doppler (fig. 4).

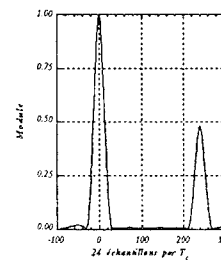


fig. 4.a

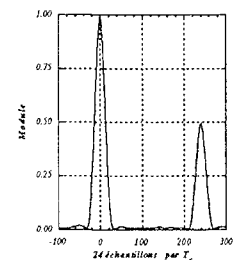


fig. 4.b

fig. 4 : Signal reçu corrélé à différentes fréquences (a :  $\Delta f_i = 0$  Hz, b :  $\Delta f_i = 0,5$  Hz)

Nous obtenons donc les estimations initiales  $\hat{\alpha}^{(0)}$ ,  $\hat{\tau}^{(0)}$ ,  $\hat{f}_d^{(0)}$  de l'atténuation, du retard et du décalage Doppler pour chaque trajet après la sélection et la détection des plus grands pics (fig. 5).

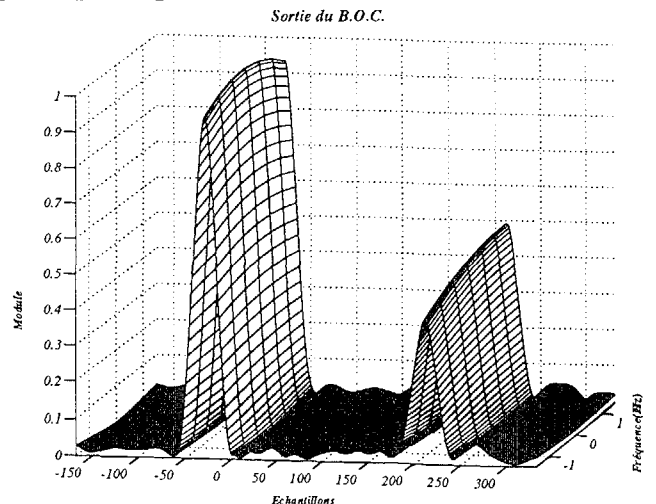


fig. 5 : Sortie du banc d'oscillateurs et de corrélateurs

### 3.3. Mise en oeuvre de l'algorithme

Pour appliquer l'algorithme, nous considérons le signal reçu en bande de base qui s'écrit :

$$\tilde{r}(t) = \sum_{k=1}^N [\tilde{r}_k(t) + \tilde{b}_k(t)] \quad (3)$$

$$\text{avec : } \tilde{r}_k(t) = \alpha_k s(t - \tau_k) \exp\{j(2\pi f_{dk}t + \psi_k)\} \quad (4)$$

$$\psi_k = -2\pi(f_0 + f_{dk})\tau_k \quad (5)$$

et  $\tilde{b}_k(t)$  est la composante en bande de base du bruit pour le  $k^{\text{ième}}$  écho.

A la  $(n+1)^{\text{ième}}$  itération, l'algorithme utilise la  $n^{\text{ième}}$  estimation des paramètres pour calculer chaque composante  $\hat{r}_k(t)$  du signal définie par :

$$\hat{r}_k^{(n)}(t) = \hat{\alpha}_k^{(n)} s(t - \hat{\tau}_k^{(n)}) \exp\{j(2\pi \hat{f}_{dk}^{(n)} t + \hat{\psi}_k^{(n)})\} + \hat{\beta}_k^{(n)} \hat{b}_k^{(n)}(t) \quad (6)$$

où le bruit estimé est :

$$\hat{b}_k^{(n)}(t) = \tilde{r}(t) - \sum_{k=1}^{\hat{N}} \hat{\alpha}_k^{(n)} s(t - \hat{\tau}_k^{(n)}) \exp\{j(2\pi \hat{f}_{dk}^{(n)} t + \hat{\psi}_k^{(n)})\} \quad (7)$$

et les coefficients sont définis de telle façon que :

$$\sum_{k=1}^{\hat{N}} \hat{\beta}_k^{(n)} = 1 \quad (8)$$

D'après l'algorithme EM, les paramètres à l'itération suivante sont ceux qui maximisent la quantité :

$$Q(\tau_k, f_{dk}) = \int_{N_c T_c} \hat{r}_k^{(n)}(t) s(t - \tau_k) \exp\{j(2\pi f_{dk} t + \psi_k)\} dt \quad (9)$$

La maximisation de cette quantité par des méthodes classiques d'optimisation ne donne pas de résultats satisfaisants. Nous avons donc été amenés à définir deux nouvelles quantités : l'intercorrélation bruitée et l'intercorrélation résiduelle. Les expressions de ces deux quantités sont respectivement :

$$IB_k = \sum_{m=-M}^M |\hat{r}_k^{(n)}(t) \exp\{-j2\pi f_{dk} t\} * s(t)|^2 \quad (10)$$

$$IR_k = \sum_{m=-M}^M \left[ \hat{r}_k^{(n)}(t) - \hat{\alpha}_k^{(n)} s(t - \hat{\tau}_k^{(n)}) e^{j(2\pi \hat{f}_{dk}^{(n)} t + \hat{\psi}_k^{(n)})} \right] e^{-j2\pi f_{dk} t} * s(t) \quad (11)$$

Quand les paramètres sont bien estimés, nous avons pour chaque  $IB_k$  un unique pic qui nous donne les estimations de l'atténuation, du retard et du décalage Doppler. Le but de cet algorithme est donc d'annuler les pics interférants c'est-à-dire de minimiser  $IR_k$ . Sur la figure 6.a, nous voyons les intercorrélations bruitées du premier écho quand il y a une erreur d'estimation sur le retard du second écho. Les intercorrélations bruitées quand il n'y a pas d'erreur c'est-à-dire quand l'algorithme a convergé sont montrées sur la figure fig. 6.b

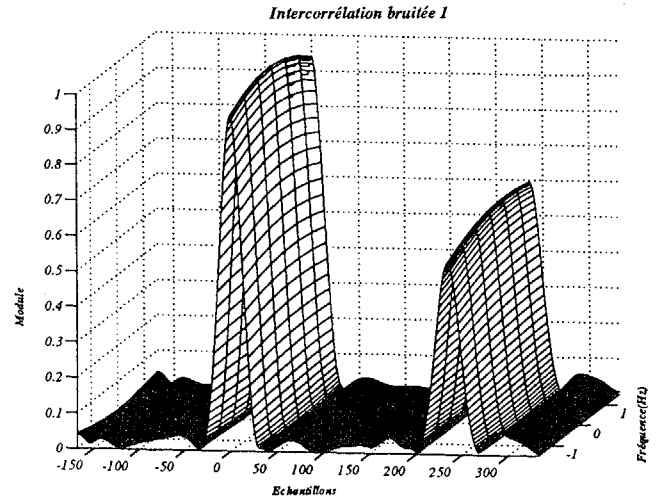


fig. 6.a : Erreur d'estimation du retard

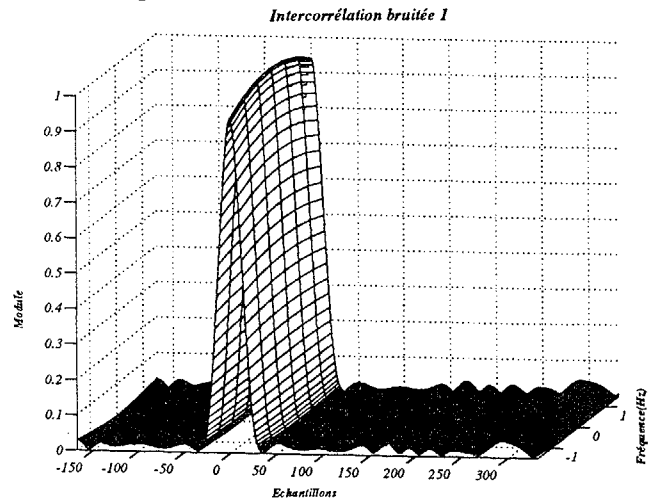


fig. 6.b : Pas d'erreur d'estimation

Nous estimons donc les différents paramètres de chaque écho sur une séquence quand les intercorrélations résiduelles atteignent leurs minimums pour chaque écho détecté.

## 4 - APPLICATION DE L'ALGORITHME DE SYNTONISATION DES PICS INTERFERANTS DANS LE CAS DE SIGNAUX REELS

Nous présentons ici le résultat de la caractérisation d'un canal acoustique sous-marin. La distance émetteur-récepteur est de 1000 m et le rapport signal sur bruit mesuré est de 9,6 dB. Le tableau suivant ainsi que la figure 7 ont été obtenus à partir de l'estimation initiale des paramètres. La présence de pics parasites sur la figure 7 indique un erreur d'estimation des paramètres.

Echo	$\hat{\tau}_k^{(0)}$	$\hat{\alpha}_k^{(0)}$	$\hat{f}_{dk}^{(0)}$ (Hz)	$IB_k$	$IR_k$
1	0	1,00	-4,0	$1,46 \cdot 10^{10}$	$2,73 \cdot 10^9$
2	187	0,34	-4,5	$1,19 \cdot 10^9$	$4,79 \cdot 10^8$
3	252	0,16	-4,0	$3,48 \cdot 10^8$	$1,31 \cdot 10^8$

tab. 1 : Estimation initiale des paramètres

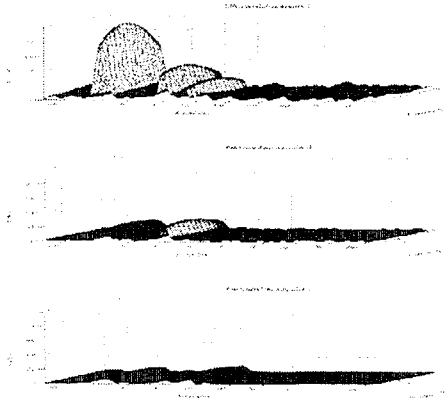


fig. 7 : Intercorrélations bruitées après estimation initiale des paramètres

Ces différents paramètres sont ensuite fournis à l'algorithme qui, après optimisation de ces paramètres, donne les résultats regroupés dans le tableau 2. Ces résultats ont permis de tracer la figure 8. L'intercorrélation résiduelle des différents échos, après optimisation des paramètres, est inférieure à celle obtenue lors de l'estimation initiale des paramètres. L'algorithme a donc optimisé correctement les paramètres. L'absence de pics interférants sur la figure 8 valide ce résultat.

Echo	$\hat{\tau}_k^{(0)}$	$\hat{\alpha}_k^{(0)}$	$\hat{f}_{dk}^{(0)}$ (Hz)	$IB_k$	$IR_k$
1	3	1,00	-3,0	$1,37 \cdot 10^{10}$	$1,59 \cdot 10^9$
2	187	0,34	-4,5	$1,56 \cdot 10^9$	$2,22 \cdot 10^8$
3	254	0,16	-4,0	$3,34 \cdot 10^8$	$5,24 \cdot 10^7$

tab. 2 : Paramètres optimisés

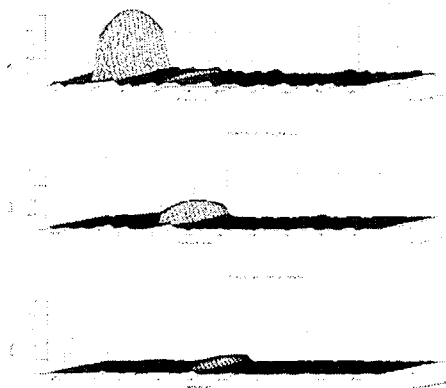


fig. 8 : Intercorrélations bruitées après optimisation des paramètres

L'étude des différents résultats de cette configuration permet de déterminer un étalement temporel de la réponse impulsionnelle du canal de 467 échantillons soit 9,73 ms. Les différents échos sont affectés d'un décalage Doppler variant de -5,5 à -1 Hz. Le nombre d'échos détectés varie de 3 à 4.

## 5 - CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons abordé le problème de la

caractérisation d'un canal de transmission sélectif en fréquence et non stationnaire. Nous nous sommes tout particulièrement attachés au canal acoustique sous-marin horizontal par petits fonds. Nous avons détaillé l'algorithme de syntonisation des pics interférants. Cet algorithme permet d'optimiser les estimations initiales des paramètres et une grandeur (intercorrélation résiduelle) mesure la fiabilité de la convergence. Nous avons donné un exemple d'utilisation de celui-ci dans le cas de signaux réels.

L'algorithme de syntonisation des pics interférants est utilisable notamment pour les systèmes de communications adaptatifs ainsi que pour les systèmes de communications numériques multicapteurs.

## REFERENCES

- [1] A. P. Dempster, N. M. Laird, and D. B. Rubin, "Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm" *J. Roy. Stat. Soc.*, Ser. 39, pp. 1-38, 1977.
- [2] M. Feder and E. Weinstein, "Parameter estimation of superimposed signals using the EM algorithm", *IEEE Trans. Acoust. Speech. Signal Processing*, vol ASSP-36, pp. 477-489. Apr. 1988.
- [3] M. Feder, J. A. Catipovic, "Algorithms for joint channel estimation and data recovery - Application to equalization in underwater communications", *IEEE Jour. Ocean. Engi.*, vol. 16, Jan. 1991.
- [4] J. Millet, G. Jourdain, "Signaux à fort pouvoir de résolution temps -fréquence. Comparaison entre les signaux de Costas et les signaux à modulation binaire de phase (B.P.S.K.)", *Traitement du signal*, vol. 7, n°1, pp 27-40, Janvier 1990.