

# Séparation de mélange convolutif de signaux de communications en acoustique sous-marine

Sandrine BONNIFAY<sup>1</sup>, Koffi YAO<sup>1,3</sup>, Christian JUTTEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IRENav, Ecole Navale  
BP 600, 29240 Brest Naval, France

<sup>2</sup>LIS, INPG  
46, av. Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex, France  
yao@ecole-navale.fr, christian.jutten@inpg.fr

**Résumé** — La propagation de l’onde acoustique dans le canal sous-marin se fait par trajets multiples. Les mélanges sont modélisés par une matrice  $(2 \times 2)$  de filtres RIF dans la configuration deux sources et deux capteurs. L’hypothèse du système de mélange à phase minimale communément adoptée n’est pas prise en compte. Les filtres de séparation RII sont estimés par des filtres RIF. Nous proposons une méthode simple pour estimer l’ordre des filtres RIF à partir des retards des maxima des autocorrélations des observations. L’algorithme basé sur la maximisation d’entropie proposé par Amari *et al.* [1] est utilisé pour réaliser la séparation de mélanges réalistes de signaux de communication de type PSK.

**Abstract** — Underwater acoustic channel is characterized by the multi-path propagation of signals. The mixtures in this channel are modelled by a  $(2 \times 2)$  FIR matrix if a two sources and two sensors configuration is considered. The minimum phase system assumption commonly adopted is not considered for our mixtures. The IIR separation filters are estimated by FIR filters. To estimate the order of these filters, we propose a simple method based on the maxima of the time lags of the autocorrelation functions of the observed signals. Using the entropy maximization algorithm proposed by Amari *et al.* [1], separation of realistic mixtures of PSK communication signals has been achieved.

## 1 Introduction

Cet article traite du problème de la séparation de signaux de communication dans le contexte des transmissions sous-marines. La séparation de sources (SdS) est largement étudiée dans la littérature, néanmoins très peu de cas sont faits des applications de la SdS en acoustique sous-marine qui sont pourtant nombreuses. On peut citer l’écoute passive pour la surveillance des zones sensibles (zones portuaires et côtières ..), l’augmentation du débit des transmissions par émission simultanément de plusieurs signaux.

La propagation d’une onde acoustique dans le milieu océanique est caractérisée par des trajets multiples et une atténuation qui augmente avec la fréquence de l’onde. Le canal est alors modélisé par un filtre causal à réponse impulsionnelle finie (RIF).

Soient  $m$  signaux émis simultanément, le signal observé par un capteur est un mélange convolutif des  $m$  signaux sources. Dans notre approche, nous considérons  $p$  capteurs, avec  $p \geq m$ . L’objectif de la séparation est d’obtenir des signaux de sortie statistiquement indépendants qui soient les estimés des signaux sources. Les signaux sources sont supposés indépendants et identiquement distribués (i.i.d.).

La qualité de la séparation et de la reconstruction des signaux dépend entre autre de l’initialisation du système de séparation et en particulier du choix de l’ordre des filtres qui le composent. Or, l’estimation de l’ordre de ces filtres est un problème mal posé. Pour estimer l’ordre des filtres de séparation, nous proposons une méthode simple basée sur la mesure des retards des maxima des fonctions d’autocorrélation des observations.

Une hypothèse classique en séparation de sources consiste à supposer le système de mélange  $H(z)$  à phase minimale, *i.e* d’inverse stable et causal. Or, cette hypothèse est difficilement vérifiable expérimentalement et nous avons opté pour des méthodes capables de séparer des mélanges à phase non minimale aussi bien qu’à phase minimale. Nous utilisons l’algorithme du gradient naturel proposé par Amari *et al.* [1] pour réaliser la séparation de signaux de communication.

## 2 Position du problème

Dans une configuration deux sources et deux capteurs, la transformation en  $Z$  des signaux observés s’expriment par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} X_1(z) \\ X_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}(z) & H_{12}(z) \\ H_{21}(z) & H_{22}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1(z) \\ S_2(z) \end{bmatrix} \quad (1)$$

où  $S_1(z)$  et  $S_2(z)$  sont les TZ des signaux sources et  $H_{ij}(z)$  la TZ de la RI du canal de propagation entre la source  $j$  et le capteur  $i$ .

---

<sup>3</sup> Adresse à partir de septembre 2001 :  
UBO/IUP Télécommunications et Réseaux  
6, avenue Le Gorgeu BP 809 29285, BREST cedex France  
yao@univ-brest.fr

De nombreux algorithmes de séparation simplifient l'écriture du mélange et par conséquent le problème, en imposant aux filtres diagonaux  $h_{ii}(z)$  d'être des filtres unités (chaque filtre étant réduit à un coefficient scalaire) [3, 4]. Si l'application visée est en accord avec cette hypothèse, les signaux sources peuvent être identifiés. Or, en communication sous-marine, cette hypothèse n'est généralement pas valable. L'utilisation de tels algorithmes conduit alors à l'estimation des versions filtrées des signaux sources, c'est-à-dire à une solution non acceptable.

Afin de retrouver les signaux sources, il est nécessaire de considérer la matrice de mélange de l'équation (1).

Le système de séparation s'écrit sous la forme d'une matrice de  $(2 \times 2)$  filtres. Les sorties du système s'expriment par :

$$Y(z) = W(z)X(z) = \begin{bmatrix} W_{11}(z) & W_{12}(z) \\ W_{21}(z) & W_{22}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(z) \\ X_2(z) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Les signaux sont séparés si le système globale  $G(z) = W(z)H(z)$  est diagonal. On obtient alors, par identification, un système de deux équations à quatre inconnues  $W_{ij}(z)$ . Les solutions ne sont donc pas uniques et elles permettent toutes d'obtenir des signaux de sortie  $Y(z)$  indépendants. En imposant aux filtres  $W_{ij}(z)$  d'être RIF, on trouve alors les solutions uniques suivantes :

$$\begin{aligned} W_{11}(z) &= H_{22}(z) & W_{12}(z) &= -H_{12}(z) \\ W_{22}(z) &= H_{11}(z) & W_{21}(z) &= -H_{21}(z) \end{aligned} \quad (3)$$

L'identification des signaux sources est réalisée si  $G(z)$  correspond à la transformation identité. On montre facilement que lorsque le système n'est pas à phase minimale, la structure de séparation est nécessairement une structure directe. Les signaux sources sont alors estimés par les sorties d'expression :

$$\hat{Y}(z) = \widehat{W}(z)X(z) = \begin{bmatrix} \widehat{W}_{11}(z) & \widehat{W}_{12}(z) \\ \widehat{W}_{21}(z) & \widehat{W}_{22}(z) \end{bmatrix} X(z) \quad (4)$$

où

$$\widehat{W}_{ij}(z) = \frac{W_{ij}(z)}{W_{11}(z)W_{22}(z) - W_{12}(z)W_{21}(z)} \quad (5)$$

avec  $W_{ij}(z)$  solutions de l'équation (3).

Les filtres RII de séparation sont en pratique approximatés par des filtres RIF dont l'ordre doit être suffisamment élevé pour obtenir une bonne estimation.

L'estimation des coefficients des filtres de séparation  $\widehat{W}_{ij}(z)$  doit donc être précédée d'une étape d'estimation de l'ordre minimum de ces filtres.

### 3 Ordre des filtres de séparation

La réponse impulsionnelle du canal sous-marin est composée de pics associés à chaque arrivée de l'onde. Le retard du premier écho correspond au temps de propagation entre la source et le capteur. Par conséquent, on peut écrire les filtres de mélange sous la forme suivante :

$$H_{ij}(z) = A_{ij}(z)z^{-k_{ij}} \quad (6)$$

avec  $A_{ij}(\infty) \neq 0$  et  $k_{ij}$  désignant le temps de propagation entre la source  $j$  et le capteur  $i$ .

Dans la configuration adoptée pour cette étude, les distances sources-capteurs sont supposées équivalentes. On a donc  $k_1 = k_{ij} \sim k_{ji}, \forall i, j \in \{1, 2\}$  d'où l'expression des filtres de séparation en fonction des filtres de mélange :

$$\widehat{W}_{ij}(z) \sim (-1)^{i+j} \frac{A_{ij}z^{+k_1}}{A_{11}(z)A_{22}(z) - A_{12}(z)A_{21}(z)} \quad (7)$$

Le retard  $k_1$  étant commun aux quatre filtres  $\widehat{W}_{ij}(z)$ , on se contente d'estimer les filtres  $\widehat{W}_{ij}(z)z^{-k_1}$ .

Le choix de l'ordre du filtre  $\widehat{W}_{ij}(z)z^{-k_1}$  est délicat. Si l'ordre est insuffisant, l'identification des signaux sources n'est pas possible. En revanche, un ordre trop élevé diminue la qualité de l'estimation des paramètres des filtres et la vitesse de convergence de l'algorithme. Nous pouvons cependant obtenir une estimation de l'ordre du dénominateur  $D(z) = [A_{11}(z)A_{22}(z) - A_{12}(z)A_{21}(z)]$  à partir des mesures des retards des maxima des fonctions d'autocorrélation des observations [5].

En effet, l'autocorrélation du signal observé sur le capteur 1 s'écrit :

$$\begin{aligned} C_{x_1x_1}(\tau) &= \frac{1}{N} \sum_m h_{11}(m) \sum_{m_c} h_{11}^*(m_c) C_{s_1s_1}(\tau + m_c - m) \\ &+ \frac{1}{N} \sum_p h_{12}(p) \sum_{p_c} h_{12}^*(p_c) C_{s_2s_2}(\tau + p_c - p) \end{aligned} \quad (8)$$

Soient  $\{m_{11}\}$  et  $\{m_{12}\}$  les ensembles des retards associés aux pics des RI  $\{h_{11}\}$  et  $\{h_{12}\}$ . Les signaux sources étant i.i.d., l'autocorrélation  $C_{x_1x_1}(\tau)$  présente des maxima pour les valeurs de  $\tau = m - m_c$  avec  $m, m_c \in \{m_{11}\}$  ou  $m, m_c \in \{m_{12}\}$ .

L'expression (6) de  $H_{ij}(z)$  permet d'exprimer le retard noté  $O_1$  du dernier maximum de l'autocorrélation  $C_{x_1x_1}(\tau)$  en fonction de l'ordre des filtres  $A_{ij}(z)$  :

$$O_1 = \begin{cases} \text{Max}\{m_{11}\} - k_{11} \sim \text{Ordre}(A_{11}) \\ \text{ou} \\ \text{Max}\{m_{12}\} - k_{12} \sim \text{Ordre}(A_{12}) \end{cases} \quad (9)$$

De même, le retard du dernier maximum de l'autocorrélation du signal observé sur le capteur 2 fournit

$$O_2 = \begin{cases} \text{Max}\{m_{22}\} - k_{22} \sim \text{Ordre}(A_{22}) \\ \text{ou} \\ \text{Max}\{m_{21}\} - k_{21} \sim \text{Ordre}(A_{21}) \end{cases} \quad (10)$$

L'ordre du dénominateur  $D(z)$  peut alors être estimé par :

$$\text{Ordre}(D) \sim O_1 + O_2 \quad (11)$$

Dans cette étude, nous avons choisi l'ordre des quatre filtres de séparation égaux et valant cinq fois  $\text{Ordre}(D)$ .

## 4 Séparation

### 4.1 Algorithme de séparation

Parmi les méthodes de séparation de sources développées dans la littérature, nous avons opté pour l'algorithme proposé par Amari *et al.* [1] basé sur la maximisation d'entropie.

L'adaptation de la matrice de filtres de séparation  $\widehat{W}(z)$  se fait selon un gradient naturel :

$$\widehat{W}(n+1, z) = \widehat{W}(n, z) - \mu \Phi(\widehat{W}) \widehat{W}(n, z) \quad (12)$$

Cette approche possède la propriété d'équivariance qui rend les performances de l'algorithme indépendantes de la matrice de mélange [1, 2].

La fonction de coût  $\Phi(\widehat{W}(z, n))$  à minimiser est la suivante :

$$\Phi(\widehat{W}) = - \sum_{i=1}^2 \log p_i(y_i(n)) - \frac{1}{2\pi j} \oint \log |\det \widehat{W}(n, z)| z^{-1} dz \quad (13)$$

La matrice de séparation est décomposée en matrices scalaires pour chaque retard :

$$\widehat{W}(n, z) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \widehat{W}_p(n) z^{-p} \quad (14)$$

Les filtres de séparation RIF d'ordre  $L$  sont non causaux si le système de mélange est à phase non minimale. Pour s'affranchir de la non causalité, les auteurs montrent qu'en pratique chaque matrice  $\widehat{W}_p$  peut être adaptée selon le schéma :

$$\widehat{W}_p(n+1) = \widehat{W}_p(n) - \mu [\widehat{W}_p(n) - f(\mathbf{y}(n-L)) \mathbf{u}^{*T}(n-p)] \quad (15)$$

avec

$$\mathbf{y}(n) = \sum_{p=0}^L \widehat{W}_p(n) \mathbf{x}(n-p) \quad (16)$$

$$\mathbf{u}(n) = \sum_{q=0}^L \widehat{W}_{L-q}^{*T}(n) \mathbf{y}(n-q) \quad (17)$$

$f_i(y_i) = -\frac{d}{dy_i} \log p_i(y_i)$  désigne la fonction score avec  $p_i(y_i)$  la densité de probabilité de la source  $s_i$ . Dans le cas de signaux de communication on peut utiliser l'approximation suivante  $f_i(y_i) = y_i |y_i|^2$

## 4.2 Simulations

Les signaux sources sont des signaux de communication à bande étroite émis autour d'une porteuse de 12 kHz. Les sources 1 et 2 émettent respectivement une modulation de phase (PSK) à 2 états et 4 états.

Les sources sont positionnées près du fond (95 et 105 m) et les capteurs près de la surface (15 et 25 m). Les distances source-capteur sont de 500 m. Le canal est supposé stationnaire.

Le modèle de pression fourni par la théorie des modes normaux permet d'obtenir les réponses impulsionnelles des canaux de propagation à partir d'un profil de célérité mesuré expérimentalement [5].

Les RI des filtres de mélange obtenues possèdent des coefficients non nuls pour les retards suivants :

$$\begin{aligned} h_{11}(k) \neq 0 & \text{ pour } k = 340 \quad 343 \quad 347 \\ h_{12}(k) \neq 0 & \text{ pour } k = 339 \quad 344 \quad 349 \\ h_{21}(k) \neq 0 & \text{ pour } k = 339 \quad 341 \quad 345 \quad 349 \\ h_{22}(k) \neq 0 & \text{ pour } k = 338 \quad 343 \quad 351 \end{aligned} \quad (18)$$

Dans ce cas, le filtre  $[H_{11}(z)H_{22}(z) - H_{12}(z)H_{21}(z)]$  possède des zéros situés à l'extérieur du cercle unité. Le système de mélange (1) est alors à phase non minimale. Cette

remarque a été formulée pour plusieurs mélanges synthétiques et nous conforte dans notre choix de ne retenir que les méthodes de séparation capables de séparer des mélanges à phase non minimale [5].

Un bruit blanc gaussien est additionné à chaque observation tel que le rapport signal à bruit soit de 20 dB. Les signaux observés sont représentés sur la figure 1.

### Estimation de l'ordre des filtres de séparation

L'autocorrélation de l'observation  $X_1$ , représentée sur la figure 1 fournit une estimation  $O_1 \simeq 10$  de la dispersion temporelle maximale entre les filtres de mélange  $H_{11}(z)$  et  $H_{12}(z)$ . De même, l'autocorrélation du signal observé  $X_2$  fournit une estimation  $O_2 \simeq 12$  de la dispersion temporelle maximale entre les filtres de mélange  $H_{21}(z)$  et  $H_{22}(z)$ . Nous pouvons alors estimer que le dénominateur  $D(z) = [A_{11}(z)A_{22}(z) - A_{12}(z)A_{21}(z)]$  est d'ordre environ 20.

Les filtres de séparation sont choisis de longueur égale à 5 fois la longueur du filtre dénominateur  $D(z)$ , soit 100 coefficients. Le système de mélange étant à phase non minimale, il est nécessaire d'initialiser les filtres de séparation de façon non causale. Ainsi, les filtres de séparation sont initialisés par des filtres de longueur  $L = 100$  telle que

$$\hat{w}_{ij}(k) = 0, \quad i, j \in \{1, 2\}, i \neq j, \forall k \quad (19)$$

$$\hat{w}_{ii}(k) = \begin{cases} 1 & \text{pour } k = 50, \quad i, j \in \{1, 2\} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (20)$$

### Séparation

Les quatre filtres de séparation étant initialisés à des longueurs égales à 100 coefficients, le nombre total de paramètres à estimer est de 400.

La qualité de l'estimation est mesurée par de l'Interférence Intersymbole (ISI) entre les coefficients des filtres de la matrice globale  $G(z)$  de la transformation mélange-séparation. L'ISI est définie par les relations suivantes

$$ISI_{ij} = \frac{\sum_k |g_{ii}(k)|^2 - \max_k |g_{ii}(k)|^2}{\max_k |g_{ii}(k)|^2}, \quad i = 1, 2 \quad (21)$$

$$ISI_{ij} = \sum_k |g_{ij}(k)|^2, \quad i, j \in \{1, 2\}, i \neq j \quad (22)$$

La figure 2 montre l'évolution de l'ISI pour les quatre filtres au cours de l'estimation. Les valeurs de  $ISI_{11}$  et  $ISI_{22}$  tendent vers la valeur 1 souhaitée. Les valeurs de  $ISI_{12}$  et  $ISI_{21}$  tendent vers la valeur 0. Le système global tend alors vers la transformation identité. La convergence de l'algorithme est atteinte à partir de 150000 itérations. Les signaux sources reconstruits sont représentés sur la figure 3. Les deux modulations sont donc retrouvées à une rotation près qui se traduit par une indétermination sur la phase.

Des simulations ont montré que le nombre d'échantillons des observations nécessaire pour estimer  $P$  paramètres est d'environ  $10 \times P$ . Dans le cas d'un canal stationnaire, cette condition ne constitue pas une contrainte. Or, expérimentalement, la durée sur laquelle on peut considérer le canal sous-marin stationnaire peut s'avérer inférieure à celle équivalent au  $10 \times P$  échantillons. L'algorithme ne peut alors converger jusqu'aux solutions permettant la reconstruction des signaux sources.

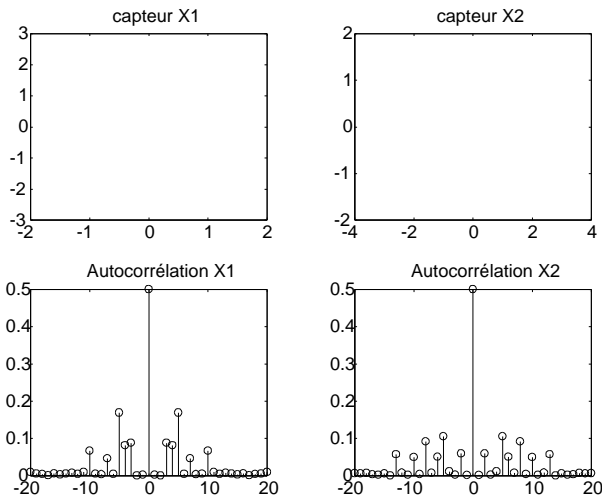


FIG. 1: Observations et modules de leur autocorrélation

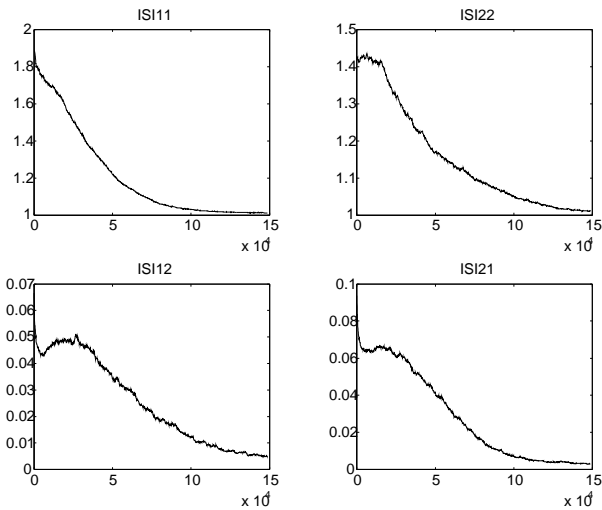


FIG. 2: Interférence Intersymbole (ISI) entre les coefficients des filtres de la matrice globale  $G(z)$

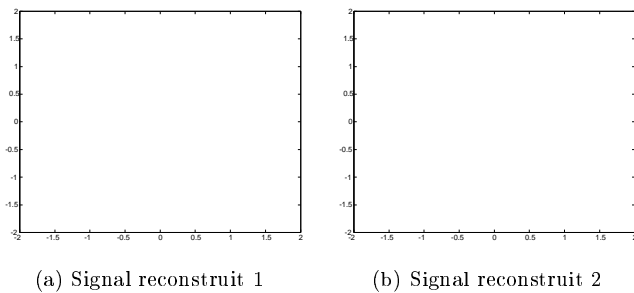


FIG. 3: Signaux sources reconstruits

## 5 Conclusions

La séparation de signaux de communication numérique mélangés dans un canal sous-marin dans une configuration deux sources et deux capteurs a été présentée. La qualité de la séparation et de la reconstruction des signaux dépend du choix de l'ordre des filtres de séparation à l'initialisation du système.

Nous avons choisi d'estimer les filtres de séparation qui sont des filtres RII par des filtres RIF. Pour estimer l'ordre de ces filtres RIF, une méthode simple basée sur la mesure des fonctions d'autocorrélation des signaux reçus a été proposée.

L'algorithme du gradient naturel d'Amari est utilisé pour l'adaptation des coefficients des filtres de séparation.

Des résultats très satisfaisants de séparation ont été obtenus avec des simulations réalisées sur des signaux de communication numérique dans un mélange réaliste.

Ces résultats montrent que l'application de la SdS aux signaux expérimentaux est réalisable moyennant quelques précautions par rapport à la non-stationnarité du canal.

## Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil Régional de Bretagne et l'EPSHOM (l'Établissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) pour leur soutien financier de l'étude.

## Références

- [1] S. Amari, S. Douglas, A. Cichocki et H. Yang. Multichannel blind deconvolution and equalization using the natural gradient. *Signal Processing Advance in Wireless Communication Workshop.citeseer.nj.nec.com/349078.html*. 1997
- [2] J.-F. Cardoso et B.-H. Laheld. Equivariant adaptive source separation. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 44(12) :3017-3030, 1996.
- [3] H.-L. Nguyen Thi et C. Jutten. Blind source separation for convolutive mixtures. *Signal Processing*. 45 :209-229, 1995.
- [4] D. Yellin et E. Weinstein. Criteria for Multichannel Signal Separation. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 42(8) :2158-2167, 1994.
- [5] S. Bonnifay. Séparation de sources appliquées aux communications sous-marines. *Thèse UBO*. Soutenance prévue en septembre 2001.