

# Modélisation des Effets du Mouvement dans des Configurations Mutlitrajets à l'aide de Filtrage Retard/Doppler basé sur les Déformations temporelles

Nicolas F. JOSSO<sup>1</sup>, Cornel IOANA<sup>1</sup>, Cédric GERVAISE<sup>2</sup>, Jérôme I. MARS<sup>1</sup> Yann STÉPHAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GIPSA-lab, Grenoble Institute of Technology, 961, rue de la Houille Blanche, 38402 St Martin d'Hères, France

<sup>2</sup>E3I2, EA3876, ENSIETA, 2 rue François Verny, 29806 Brest Cedex, France

<sup>3</sup>SHOM, CS52817, 13 rue du Chatellier, 29228 Brest Cedex 2, France

nicolas.josso@gipsa-lab.inpg.fr, cornel.ioana@gipsa-lab.inpg.fr  
cedric.gervaise@ensieta.fr, jerome.mars@gipsa-lab.inpg.fr, yann.stephan@shom.fr

**Résumé** – La connaissance de la RI (Réponse Impulsionnelle) d'un canal de propagation est nécessaire pour un grand nombre d'applications dans le domaine de l'acoustique sous-marine comme la communication, la localisation et la détection sonar, la surveillance des mammifères marins, etc. De manière générale, la RI nous informe sur les distorsions que subit un signal se propageant dans un canal. Dans la plupart des cas, le signal est sujet à d'autres déformations dues au mouvement existant entre la source et le récepteur. Dans la mesure où le mouvement existant entre la source et le récepteur n'est pas toujours maîtrisé, le signal reçu pourrait être alternativement corrélé avec une famille de signaux de référence qui représentent les temps de propagation et les décalages Doppler envisageables. La connaissance du signal transmis permet d'estimer la vitesse apparente de chaque trajet de propagation à l'aide du plan d'ambiguïté large bande [2]. Nous introduisons une nouvelle méthode d'estimation de la RI d'un canal de propagation dans les configurations avec mouvement rendant possible l'utilisation des procédés d'inversion acoustique classiques qui sont définis pour des configurations immobiles. Cette méthode consiste en un filtrage basé sur les opérateurs de déformation temporelle et le plan d'ambiguïté large bande qui sépare chaque trajet de façon précise afin de supprimer les interférences et d'estimer correctement la RI.

**Abstract** – The estimation of the impulse response of a propagation channel is necessary for a large number of acoustic applications: underwater communication, detection and localization, etc. Basically, it informs us about the distortions of a transmitted signal in one channel. This operation is usually subject to additional distortions due to the motion of the transmitter-channel-receiver configuration. This paper points on the effects of the motion while estimating the IR by matching filtering between the transmitted and the received signals and introduces a new motion compensation method. Knowing the transmitted signal, the apparent speed of each propagation path can be estimated using wideband ambiguity function [2]. Indeed, some interference appears in the wideband ambiguity plane because of the multipath propagation. A warping-based lag-Doppler filtering method is proposed allowing us to accurately estimate the IR of the channel.

## 1 Introduction

La connaissance de la RI (Réponse Impulsionnelle) d'un canal de propagation est nécessaire pour un grand nombre d'applications dans le domaine de l'acoustique sous-marine comme la communication, la localisation et la détection sonar, la surveillance des mammifères marins, etc. De manière générale, la RI nous informe sur les distorsions que subit un signal se propageant dans un canal. Dans la plupart des cas, le signal est sujet à d'autres déformations dues au mouvement existant entre la source et le récepteur. Le filtrage adapté [1] est une méthode efficace et bien connue pour estimer la RI d'un milieu. Lors de l'estimation de la RI par filtrage adapté, le signal reçu est corrélé avec le signal transmis. Dans la suite, nous nous concentrons sur la propagation par rayons même si l'étude reste générale et pourrait être étendue à la propagation modale.

Les effets du mouvement sur l'estimation de RI dans un environnement basse fréquence et petit fond ont été récemment présentés dans [2]. Dans la mesure où le mouvement existant entre la source et le récepteur n'est pas toujours maîtrisé, le signal reçu pourrait être alternativement corrélé avec une famille de signaux de référence qui représentent les temps de propagation et les décalages Doppler envisageables. Dans les scénarii où les signaux transmis sont de type large bande, il est nécessaire de modéliser le mouvement comme une déformation de l'échelle des temps et celui-ci ne peut pas être approché par un simple décalage fréquentiel. Ce papier se concentre sur les effets du mouvement lors de l'estimation de la RI par filtrage adapté entre le signal transmis et le signal reçu tout en introduisant une nouvelle méthode de compensation du mouvement. La connaissance du signal transmis permet d'estimer la vitesse apparente de chaque trajet de propagation à l'aide du plan d'ambi-

guité large bande [2]. La plupart du temps, la propagation multitrajet est à l'origine de l'apparition de termes d'interférence dans le plan d'ambiguïté. Nous introduisons une nouvelle méthode d'estimation de la RI d'un canal de propagation dans les configurations avec mouvement rendant possible l'utilisation des procédés d'inversion acoustique classiques qui sont définis pour des configurations immobiles. Cette méthode consiste en un filtrage basé sur les opérateurs de déformation temporelle et le plan d'ambiguïté large bande qui sépare chaque trajet de façon précise afin de supprimer les interférences et d'estimer correctement la RI.

Le papier est organisé de la façon suivante. La section 2 présente la caractérisation de l'environnement de propagation multitrajet dans des configurations avec mouvement. La section 3 donne la formulation du plan d'ambiguïté large bande utilisé. La technique de correction du mouvement est décrite dans la section 4. Des exemples de résultats obtenus sur des données simulées et réelles sont exposés en section 5. LA conclusion est présentée en section 6.

## 2 Description des effets du mouvement dans une configuration multitrajet

Considérons un récepteur immobile et une source se déplaçant à vitesse constante  $v$ . Si l'on considère que la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans le milieu,  $c$ , est constante, il est possible d'exprimer la longueur de chaque trajets de propagation grâce à la théorie des sources virtuelles. Nous considérons que la hauteur du canal de propagation est négligeable devant sa longueur et que la distance parcourue par la source durant une transmission est négligeable devant la distance de propagation afin d'obtenir l'expression du signal reçu  $s(t)$ , par rapport au signal transmis,  $e(t)$  :

$$s(t) = \sum_i a_i \eta_i^{1/2} e((t - \tau_i) \cdot \eta_i), \quad (1)$$

où  $a_i$  représente le coefficient d'atténuation du trajet  $i$ ,  $\tau_i$  le temps de propagation le long du trajet  $i$  et  $\eta_i$  le facteur de compression (ou d'expansion) dû à l'effet Doppler large-bande qui satisfait

$$\eta_i = \frac{1}{1 - \|\vec{v}\| \cos(\theta_i) \left(\frac{1}{c} - \frac{z_i}{2c \cdot x_0}\right)}, \quad (2)$$

où  $\theta_i$  représente l'angle de départ du rayon  $i$  par rapport à l'horizontale,  $z_i$  la position de la source virtuelle correspondant au trajet  $i$  selon l'axe des  $z$  et  $x_0$  la position de la source au milieu de l'émission. L'expression (1) montre que chaque trajet est une version atténuée en amplitude, retardée et comprimée du signal transmis. L'effet doppler est ici modélisé comme une contraction de l'échelle des temps et il n'est donc pas approché par un simple décalage fréquentiel.

## 3 Le plan d'ambiguïté large bande

Dans cette section, nous formulons et analysons le problème de l'estimation d'une RI à l'aide de filtrage adapté. En assu-

mant que le signal transmis est connu, le temps de propagation et la déformation Doppler (donc la vitesse) associée à chaque trajet peuvent être estimés en calculant l'intercorrélation du signal reçu et d'une famille de signaux de référence. Le jeu de signaux constituant la famille de référence est composé de versions retardées et contractées dans le temps du signal transmis pour toute une gamme discrète de retard et de vitesse envisagés [4]. Pour chaque signal de référence, nous calculons l'intercorrélation :

$$R(\tau, v) = \sum_i a_i (\eta_i)^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} e(\eta_i(t + \tau - \tau_i)) e^T(\eta_i t) dt, \quad (3)$$

où représente l'opérateur de conjugaison complexe. Les maxima locaux de cette fonction de corrélation sont atteints pour chaque trajets. En particulier, pour le  $i^{\text{ième}}$  rayon, le maximum est atteint quand le signal de la famille de référence coïncide exactement avec le  $i^{\text{ième}}$  signal reçu en retard et en Doppler. Nous supposons que l'inverse du produit de la bande fréquentielle et de la durée du signal transmis est plus petit que la plus petite différence existant entre deux arrivées consécutives afin de s'assurer que chaque rayon soit bien séparé dans le cas d'une source immobile. Cette hypothèse garantie que chaque maximum local de l'équation (3) soit détectable. Les interférences qui peuvent apparaître dans le cas contraire sont étudiées dans [4] et ne sont pas le sujet de cette étude. Un fois qu'un maximum local est détecté, le temps de propagation et la vitesse apparente associés à ce trajet peuvent être estimés.

La fonction d'ambiguïté large bande que nous introduisons ici est le module carré du résultat de l'expression (3) dont un exemple est illustré en figure 1. La figure 1 représente deux exemples du plan d'ambiguïté large bande calculés pour un signal transmis du type MLF (modulation linéaire de fréquence) dans un environnement de propagation monotrajet puis multitrajet. Dans le cas de la propagation multitrajet, chaque trajet possède une vitesse apparente et un temps de propagation différents. Si le signal transmis est une MLF, chaque trajet est représenté par une bande d'énergie inclinée qui atteint son maximum au point de coordonnées correspondant à son temps de propagation et à sa vitesse apparente.

## 4 Méthode de compensation du mouvement

Dans [2] nous avons montré que l'estimation d'une RI sans prendre en compte le mouvement est équivalent à estimer une RI ne conservant que la colonne à  $v = 0$  dans le plan d'ambiguïté large bande. Nous définissons une méthode de compensation uniforme du mouvement qui consiste à estimer la vitesse associée au premier rayon,  $v_1$ , puis à conserver la colonne à vitesse constante  $v = v_1$  dans le plan d'ambiguïté. La nouvelle méthode de compensation du mouvement que nous introduisons ici consiste à estimer et à prendre en compte une vitesse apparente différente pour chaque trajet. Le principe général de cette méthode itérative est décrit par le schéma bloc de la figure

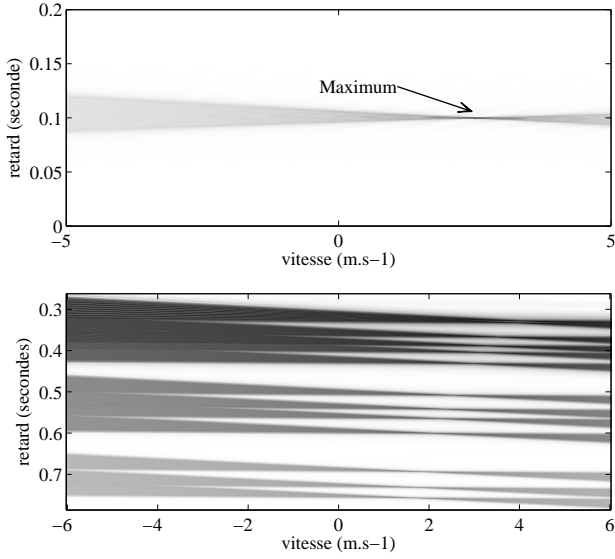


FIGURE 1 – Représentations du plan large bande calculées pour un signal transmis du type MLF dans un environnement de propagation monotrajet (à gauche) avec une vitesse de  $2.5m.s^{-1}$  et multitrajet (à droite) avec une vitesse de  $4m.s^{-1}$ . La bande de la MLF est de  $2000Hz$ , sa durée de 4 secondes et sa fréquence centrale de  $1300Hz$ .

2. La première étape de la méthode consiste à estimer le maximum absolu du plan d’ambiguïté qui correspond au point de coordonnées  $(a_1, \tau_1, v_1)$ . Le signal correspondant au premier trajet est alors modélisé analytiquement grâce aux équations (1) et (2) ce qui permet de connaître sa fréquence instantanée et d’en déduire l’opérateur de déformation temporelle [3] qui le transforme en une sinusoïde pure. La sinusoïde pure est alors filtrée dans le domaine des temps déformés puis on applique l’opérateur de déformation inverse afin de récupérer le signal reçu sans le premier trajet. Le même procédé est ensuite appliqué itérativement au signal pour chacun des trajets. La compensation adaptative du mouvement s’effectue en conservant les valeurs du plan d’ambiguïté large bande selon la courbe qui rejoint l’ensemble des  $(a_i, \tau_i, v_i)$  estimés. Les figures 3 et 4 illustrent la première itération de notre méthode de filtrage des trajets par warping. La détection du maximum absolu dans le plan d’ambiguïté est représentée par l’étoile en figure 3. On peut remarquer que les deux premiers trajets sont proches l’un de l’autre ce qui a pour effet de créer des interférences inter-trajet dans le plan d’ambiguïté. Après détection du maximum absolu, la déformation temporelle [3] correspondant à la fréquence instantanée définie en (1) est appliquée au signal reçu. Comme on peut le constater dans la partie droite de la figure 3, la représentation temps-fréquence du signal déformé en temps comporte une fréquence pure qui correspond au premier trajet uniquement. Le premier rayon est ensuite filtré dans le plan temps fréquence à l’aide d’un filtre coupe bande schématisé par les deux traits pointillés en figure 3. Le plan d’ambiguïté du signal reçu après filtrage du premier rayon et celui du premier

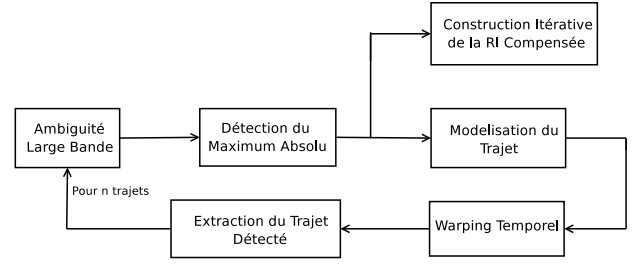


FIGURE 2 – Méthode de compensation du mouvement basée sur le filtrage par déformation temporelle et le plan d’ambiguïté large bande.

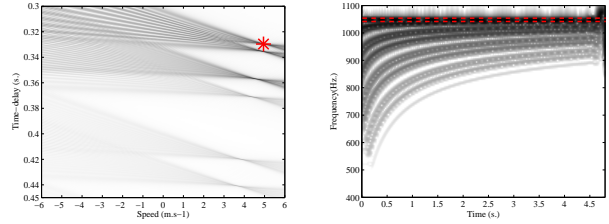


FIGURE 3 – Représentation du plan d’ambiguïté (à gauche) et du plan temps-fréquence du signal déformé en temps (à droite).

trajet sont représentés en figure 4.

## 5 Résultats et discussions

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus sur une simulation de propagation en acoustique sous marine. Nous considérons une source qui se déplace à  $5m.s^{-1}$ , à une profondeur constante de  $32m$ , distante de  $500m$  de l’hydrophone qui est situé à  $90m$  de profondeur. Le canal de propagation est profond de  $165m$  et sa vitesse de propagation acoustique est de  $1500m.s^{-1}$ . Le signal transmis est une MLF de fréquence centrale  $1300Hz$ , une bande de  $2000Hz$  et une durée de 4s. La figure 5 illustre les résultats que nous obtenons pour trois méthodes différentes. Ces méthodes sont schématisées dans le plan d’ambiguïté avec des traits pointillés selon  $v = 0$  pour l’estimation de la RI sans prise en compte du mouvement, des traits pointillés selon  $v = 5m.s^{-1}$  pour la compensation uniforme et la compensation adaptative est représentée

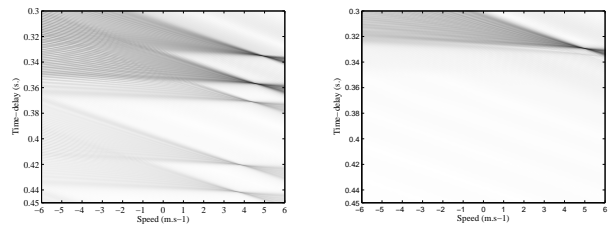


FIGURE 4 – Représentation du plan d’ambiguïté du signal reçu après extraction du premier trajet (à gauche) et du signal filtré pour le premier trajet (à droite).

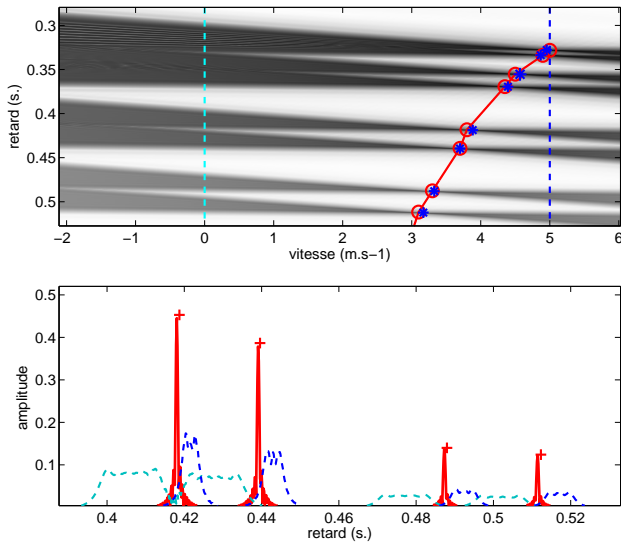


FIGURE 5 – Représentations du plan d’ambiguïté (en haut) et des RI estimées avec différentes méthodes (en bas).

à l’aide du trait plein et des étoiles. Les ronds représentent la position théorique des maxima locaux associés à chaque trajet et les étoiles illustrent les maxima locaux estimés. Les différentes estimations de la RI correspondant à chaque méthode sont illustré dans le domaine temporelle, en pointillé pour la RI sans prise en compte du mouvement, en trait hachuré pour la compensation uniforme et en trait plein pour la compensation adaptative. Les croix représentent la RI théorique simulée. On peut voir que la compensation adaptative fournit des résultats très satisfaisant et permet de retrouver la RI simulée car le mouvement est correctement pris en compte pour chaque trajet. En revanche la compensation uniforme ne permet pas d’obtenir des résultats aussi convainquant car cette méthode suppose que l’effet du mouvement est le même pour chaque trajet de propagation.

Notre méthode de compensation de mouvement pour l’estimation de RI est ensuite présentée sur les données de la campagne BASE’07 collectées par le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la marine) en collaboration avec le NURC (NATO Undersea Research Center), le FWG (Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik) et l’ARL (Applied Research laboratory). La campagne s’est déroulée dans les eaux peu profondes du plateau de Malta, au Sud de la Sicile. Les signaux transmis sont composés de MLF avec une bande fréquentielle de 2kHz, une fréquence centrale de 1.3kHz et une durée de 4s. L’exemple présenté correspond à une distance source-émetteur de 1300m pour une vitesse relative de  $2.5 \text{ m.s}^{-1}$ . Comme le suggère l’expression (1), le facteur de compression Doppler associé à chaque rayon est différent, ce qui est illustré dans la partie supérieure de la figure 6. Notre nouvelle méthode de compensation du mouvement fournit l’estimation d’une RI dans laquelle les différentes arrivées peuvent être distinguées. La RI estimée dans le plan d’ambiguïté large bande est très nettement améliorée par rap-

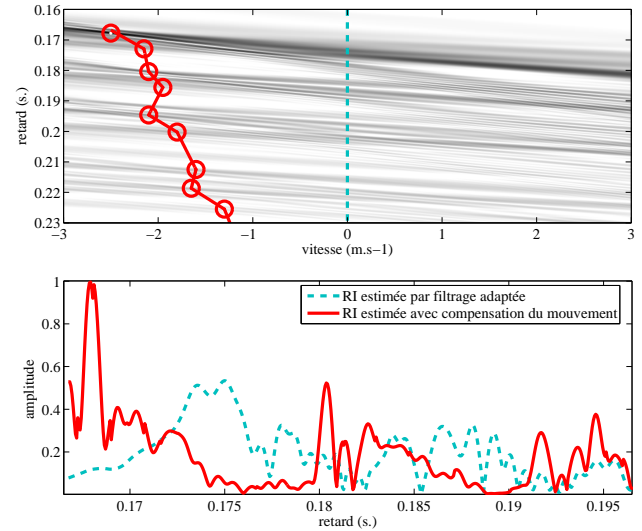


FIGURE 6 – Représentations du plan d’ambiguïté (en haut) et des RI estimées avec différentes méthodes (en bas).

port à la RI estimée par filtrage adapté, ce qui est représenté dans la partie inférieure de la figure 6.

## 6 Conclusion

Ce papier introduit une nouvelle méthode qui permet d’estimer la RI dans les configurations où la vitesse relative émetteur-récepteur est constante et inconnue durant une transmission. La méthode est basée sur le filtrage par warping des signaux reçus grâce à l’estimation de leur temps d’arrivée et de leur compression Doppler dans le plan d’ambiguïté large bande. Cette méthode peut être utilisée en tomographie active ou passive quand la vitesse de la source et celle du récepteur ne sont pas contrôlées ou sont inconnues, respectivement.

## 7 Remerciements

Les auteurs remercient le SHOM qui soutient ce travail avec la bourse de recherche N°07CR001.

## Références

- [1] M.-I. Taroudakis and G.-N. Makrakis, *Inverse Problems in Underwater Acoustics* Springer-Verlag, New York, 2001.
- [2] N. F. Josso, C. Ioana, C. Gervaise, Y. Stephan, and J. I. Mars, *Motion effect modeling in multipath configuration using warping based lag-Doppler filtering*, IEEE ICASSP 2009.
- [3] A. Jarrot, C. Ioana, A. Quinquis, *An extension of the class of unitary time-warping projectors to discrete-time sequences*, IEEE ICASSP 2006, vol.3, pp.412-415.
- [4] J.-P. Hermand and W. I. Roderick, *Delay-doppler resolution performance of large time-bandwidth-product linear fm signals in a multipath ocean environment*, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 84, pp. 1709–1727, 1988.