

Warping fréquentiel pour l'estimation du temps d'arrivée des modes en acoustique sous-marine

Julien BONNEL¹, Barbara NICOLAS¹, Dominique FATTACCIOLI² Jérôme I. MARS¹,

¹GIPSA-Lab, Département Images Signal, Grenoble INP, France
961 rue de la Houille Blanche, BP 46, F - 38402 GRENOBLE Cedex, France

²Centre Technique des Systèmes Navals, DGA,
BP 28 - 83 800 Toulon Armes, France

julien.bonnel@gipsa-lab.inpg.fr

Résumé – S'il est classique en acoustique sous marine de travailler dans un milieu petit fond, cela pose toujours des problèmes lorsque la source utilisée est basse fréquence (large bande) et qu'on utilise un seul récepteur. En effet dans cette configuration, le signal reçu est composé de plusieurs modes. Ces modes se chevauchent en temps et en fréquence, et leur motif temps-fréquence est courbé. Ce papier propose une méthode de warping fréquentiel (effectué sur le spectre du signal reçu) qui transforme un mode donné en un Dirac (en temps), rendant le signal représentable avec des méthodes classiques. Le warping fréquentiel permet d'effectuer une estimation du temps d'arrivée des modes, et peut être utilisé en prétraitement lorsqu'une détection du signal est requise. Une application sur des données réelles est présentée.

Abstract – Shallow water is a classical environment for underwater acoustics. However, it is still a challenging one when coupled with broadband low-frequency source and single receiver configuration. Indeed in this case, the received signal is formed by several modes. These modes are overlapped in time and in frequency, and their time frequency pattern has curved features. This paper presents a frequency warping method (applied on the spectrum of the received signal) which transforms a given mode into a Dirac (in time domain). The warped signal can then be represented with classical tools. The frequency warping allows an estimation of modal arrival times, and can be used as a preprocessing when signal detection is required. It is successfully applied on real data.

1 Introduction

L'acoustique sous-marine possède une place importante dans l'ingénierie marine. On peut s'en servir pour effectuer la caractérisation de l'environnement ou la localisation de source. Les protocoles classiques en mer utilisent (au moins) une antenne de capteur en réception, ce qui permet de profiter d'une grande diversité spatiale. Cependant, des techniques utilisant un seul (ou peu de) récepteur(s) commencent à se développer [1] [2] [3]. Pour contre-balancer le manque de diversité spatiale disponible, les études monorecepteurs utilisent toujours des sources large-bande, ce qui apporte une diversité fréquentielle. C'est dans ce cadre que se place cette étude. De plus, nous nous bornerons aux environnements côtiers (petit-fond) et des sources basses fréquences et impulsives. Ces dernières peuvent être naturelles (mammifères marins) ou artificielles (cans à air, sources explosives).

2 La propagation modale

Dans une configuration acoustique petit fond et basse fréquence, le modèle de propagation adapté est celui de la propagation modale. Si le milieu est invariant en distance, pour la fréquence f , la fonction de transfert H entre une source à la

profondeur z_s et un récepteur à la profondeur z_r séparés par une distance radiale r est [4] :

$$H(f) \approx Q \sum_{m=1}^{\infty} g_m(z_s) g_m(z_r) \frac{e^{jk_r(m,f)r}}{\sqrt{k_r(m,f)r}} \quad (1)$$

où g_m est la $m^{\text{ième}}$ fonction modale, $k_r(m, f)$ le nombre d'onde radial du mode m et Q une constante. Chaque terme de la somme représente la contribution d'un mode. On y retrouve des informations sur la localisation de la source (z_s, r) et sur l'environnement (via les nombres d'onde k_r et les fonctions modales g_m). Il est donc intéressant d'arriver à les représenter. Cependant, ils se chevauchent en temps et ils partagent une bande de fréquence commune. Il est donc nécessaire de travailler dans le domaine temps-fréquence.

Une source impulsive va exciter plusieurs modes qui seront chacun affectés différemment par la dispersion. L'impulsion initiale (signal source) est distordue et des structures courbes apparaissent dans le domaine temps-fréquence. Un exemple de représentation parcimonieuse théorique du signal reçu sur un hydrophone est donné figure 1. Comme les modes ont des structures temps-fréquence courbées, les représentations classiques ne sont pas adaptées pour les représenter.

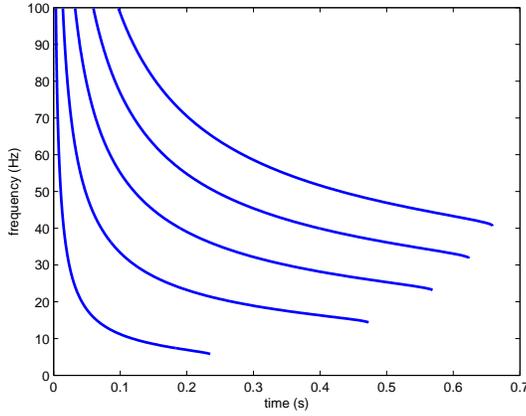


FIG. 1 – Représentation parcimonieuse théorique du signal reçu après propagation (source impulsionnelle)

3 Le warping fréquentiel

Pour étudier ce genre de signal, il est possible de créer des représentations temps-fréquence adaptées [5] [6]. Il est aussi possible de transformer le signal reçu pour pouvoir l'étudier avec des méthodes classiques. C'est ce que nous proposons dans ce papier. Comme dans [6], le signal reçu va être anamorphosé pour obtenir une meilleure représentation de l'information (on appellera dorénavant cette transformation "warping"). Le warping est basé sur un modèle de l'environnement et est calculé avec une approche par équivalence unitaire [7]. Ici, on utilise le modèle isocélère : une couche de fluide homogène entre deux surfaces parfaitement réfléchissantes. On a alors [4] :

$$k_r(m, f) = A\sqrt{f^2 - f_m^2} \quad (2)$$

avec A une constante et f_m la fréquence de coupure de chaque mode. Cette modélisation est simpliste mais suffisante dans notre cas.

Une quelconque fonction $x(f)$ anamorphosée selon une fonction de déformation $\omega(f)$ devient [7] :

$$(W_w x)(f) = \sqrt{|\omega'(f)|} x[w(f)] \quad (3)$$

Le warping peut donc être vu comme un simple changement de variable, le premier terme sous la racine carrée servant uniquement à conserver l'énergie. Dans notre cas, on définit :

$$\omega_{m_0}(f) = \sqrt{f^2 + f_{m_0}^2} \quad (4)$$

Si $X(f)$ est le spectre de la source, $Y(f)$ le signal reçu et $H(f)$ la fonction de transfert entre les deux, alors pour un seul mode m_0 transmis, le spectre Y_{m_0} transformé du signal reçu est :

$$(W_{w_{m_0}} Y_{m_0})(f) = B \frac{X(w_{m_0}(f)) e^{jCfr}}{\sqrt{f^2 + f_{m_0}^2} \sqrt{r}} \quad (5)$$

où B et C sont des constantes. On remarque que si $X(f) = \sqrt{f}$, alors le signal reçu est un Dirac. Dans le cas où plusieurs modes sont transmis, alors seul le mode m_0 est transformé en Dirac, les autres sont simplement déformés. Si le spectre de la source (impulsionnelle) n'est pas en \sqrt{f} , alors les formes des structures en temps-fréquence (données par la phase du spectre) sont conservées : le mode anamorphosé est infiniment court en temps mais son spectre n'est pas blanc. Physiquement, ce warping fréquentiel annule la dispersion du canal pour un mode donné. A titre d'exemple, la figure 2 présente le signal reçu après propagation dans un canal isocélère (données simulées) pour une source impulsionnelle de spectre blanc. Le résultat du warping fréquentiel appliqué à ce signal en supposant l'environnement connu est présenté sur la figure 3.

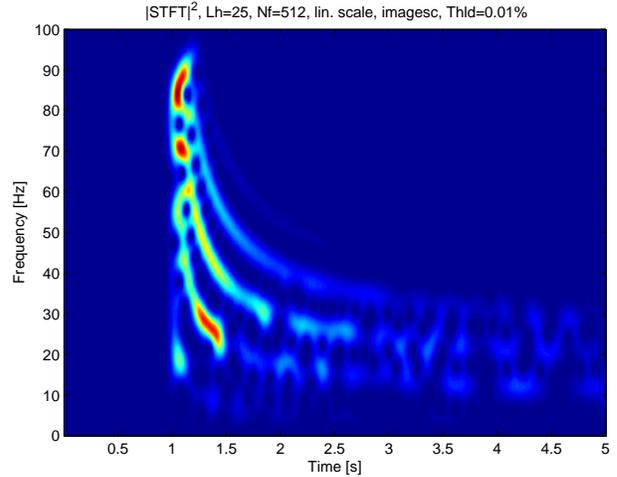


FIG. 2 – Signal reçu après propagation dans un canal isocélère simulé

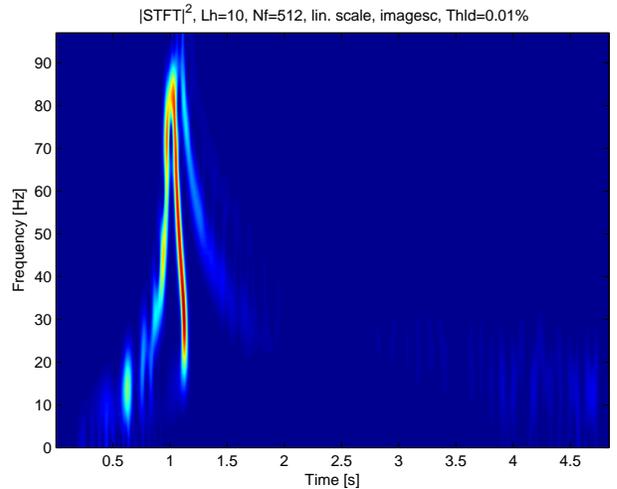


FIG. 3 – Signal anamorphosé selon le mode 3 (en bas) après propagation dans un canal isocélère simulé

4 Détection du temps d'arrivée des modes

Le warping fréquentiel est utile pour détecter le temps d'arrivée t_0 des modes. Par temps d'arrivée des modes, il faut comprendre le temps d'arrivée du paquet de modes, correspondant au trajet direct entre la source et le récepteur s'il n'y avait pas de dispersion. Dans notre cas en propagation modale, ce temps d'arrivée se retrouve théoriquement pour la partie infiniment haute fréquence des modes. Lorsque l'énergie des modes est importante uniquement en basse fréquence ou si le signal est bruité, il est difficile de détecter ce temps d'arrivée. La figure 4 illustre ce cas. Elle représente le signal reçu $s(t)$ après propagation dans un canal de Pekeris (guide d'onde réaliste pour la propagation océanique en milieu petit fond) bruité (bruit blanc, rapport signal sur bruit de 5dB). On a $t_0 = 0.505$ sec. Pour estimer le temps d'arrivée, on définit la fonction de warping

$$w_a(f) = \sqrt{f^2 + a^2} \quad (6)$$

et on applique l'algorithme suivant :

1. Calculer le spectre $S(f)$ du signal reçu $s(t)$
2. Choisir une valeur a
3. Anamorphoser $S(f)$ en utilisant $w_a(f)$
4. Calculer la transformée de Fourier inverse $s_w(t)$ du signal anamorphosé
5. Estimer la qualité du warping fréquentielle. Si elle est insuffisante, revenir à l'étape 2
6. Lorsque la qualité du warping fréquentielle est suffisante, calculer l'énergie instantannée $s_w(t)^2$ du signal anamorphosé. Son maximum correspond au temps d'arrivée des modes.

La variable a est homogène à une fréquence. La boucle (étapes 2 à 5) s'arrête lorsqu'un warping acceptable a été obtenu (un mode est devenu infiniment court en temps), ou éventuellement lorsque toute la bande de fréquence du signal a été parcourue. Comme le signal simulé ne provient pas d'un guide isocélère, le signal n'est jamais parfaitement anamorphosé. Cependant, lorsqu'un mode devient proche d'un Dirac, toute son énergie est concentrée sur un temps très court, créant un maximum important par rapport aux autres modes dont l'énergie est plus étalée dans le temps. Ce résultat est illustré par la figure 5.

Dans le cas du signal simulé dans un canal de Pekeris bruité présenté sur la figure 4, le temps d'arrivée estimé est $\hat{t}_0 = 0.51$ sec, soit une erreur correspondant à un unique échantillon (la fréquence d'échantillonnage du signal simulé est de 200 Hz).

5 Le warping fréquentiel comme pré-traitement au warping temporel

Au lieu d'effectuer un warping en fréquence (sur le spectre du signal reçu) et de transformer un mode en dirac, il est possible de faire un warping temporel (directement sur le signal reçu) et de transformer chaque mode en fréquence pure. Cette

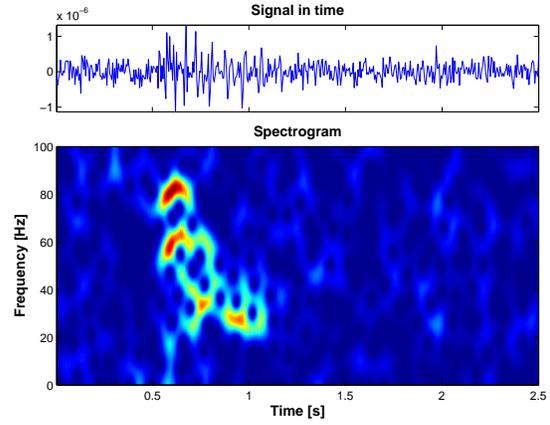


FIG. 4 – Signal reçu après propagation dans un canal de Pekeris et ajout de bruit (SNR=5dB)

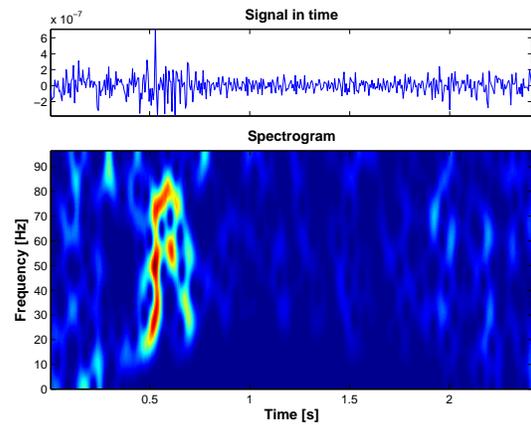


FIG. 5 – Signal anamorphosé après propagation dans un canal de Pekeris et ajout de bruit (SNR=5dB)

méthode permet de faire du filtrage modal et la localisation passive de la source [3]. En revanche, comme elle s'effectue sur le signal temporel, elle nécessite une détection précise du temps d'arrivée des modes, sans laquelle les modes ne sont pas bien anamorphosés. La méthode proposée précédemment permet cette détection. On la met en place sur des données réelles enregistrées en Mer du Nord [8]. La figure 6 présente le spectrogramme du signal reçu sur un hydrophone. On effectue la méthode de détection présentée dans la section précédente. Le signal anamorphosé (warping fréquentiel) correspondant est présenté sur la figure 7. Grâce au temps d'arrivée estimé, on peut effectuer le warping temporel du signal reçu, dont le résultat est présenté sur la figure 8. Les modes sont bien devenus des fréquences pures. Ils sont séparés dans le plan temps fréquence. Des traitements simples peuvent être appliqués pour les filtrer et effectuer la localisation de la source [3] ou l'estimation de l'environnement.

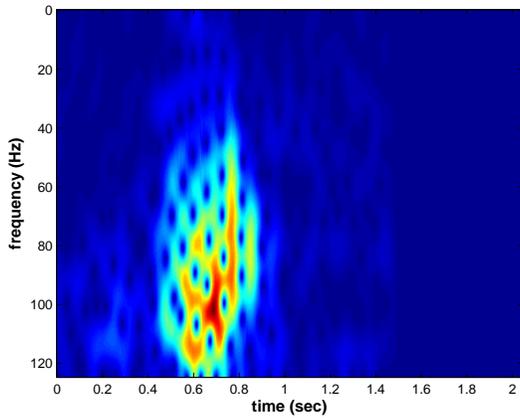


FIG. 6 – Spectrogramme du signal Mer du Nord

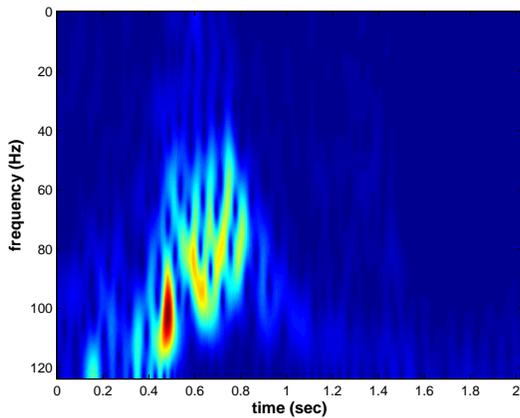


FIG. 7 – Spectrogramme du signal Mer du Nord anamorphosé (warping fréquentiel)

6 Conclusion

Le warping fréquentiel est une transformation qui permet d'adapter des signaux réels physiques aux représentation temps fréquence classiques. En acoustique sous marine, il permet l'estimation du temps d'arrivée des modes, et peut donc être utilisé en pré-traitement lorsqu'une détection précise du signal est requise. Ces résultats ont été validés sur des données réelles enregistrés en Mer du Nord.

Le warping fréquentiel a ici été présenté dans le cadre de l'acoustique sous marine pour une propagation en basse fréquence en milieu petit fond. De manière plus générale, il peut s'adapter tout signal large bande reçu après propagation dans un milieu dispersif, à condition de connaître (même grossièrement) l'allure de la loi de dispersion.

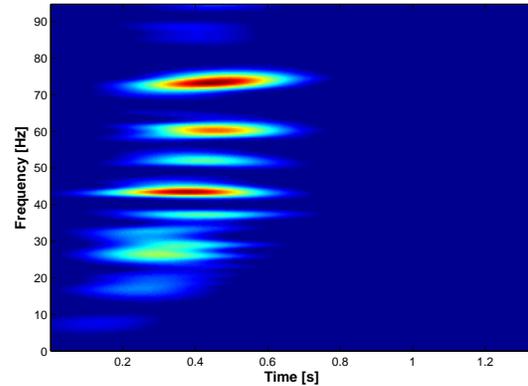


FIG. 8 – Spectrogramme du signal Mer du Nord anamorphosé (warping temporel)

Références

- [1] J.P. Hermand. Broad-band geoacoustic inversion in shallow water from waveguide impulse response measurements on a single hydrophone : theory and experimental results. *IEEE Journal of Oceanic engineering*, 24(1) :41–66, 1999.
- [2] S.M. Jesus, M. B. Porter, Y. Stephan, X. Demoulin, O.C. Rodriguez, E.Coelho. Single hydrophone source localization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 25(3) :337–346, 2000.
- [3] J. Bonnel, G. Le Touzé, B. Nicolas, J.I. Mars, C. Gervaise. *Automatic and passive whale localization in shallow water using gunshots*. Oceans'08 MTS/IEEE Quebec Oceans, Poles & Climate : Technological Challenges, Quebec city, 2008.
- [4] F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, H. Schmidt. *Computational ocean acoustics*. AIP Series in Modern acoustics and signal processing, AIP Press, Springer, 1993.
- [5] J.C. Hong, K.H. Sun, Y.Y. Kim. Dispersion-based short-time Fourier transform applied to dispersive wave analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117 :2949, 2005.
- [6] G. Le Touzé, B. Nicolas, J. I. Mars, J-L. Lacoume. *Matched representations and filters for guided waves*. IEEE Trans. Signal processing, 2009, sous presse.
- [7] R. G. Baraniuk, D. L. Jones. *Unitary equivalence : a new twist on signal processing*. IEEE Trans. Signal Processing, 43(16) : 2269-2282, 1995.
- [8] B. Nicolas, J.I. Mars, J.L. Lacoume, *Geoacoustical parameters estimation with impulsive and boat-noise sources*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 28(3) : 494–501, 2003.