Représentations Temps-Fréquence de la classe de puissance basées sur l'invariant océanique

Julien Bonnel[1], Grégoire Le Touzé[2], Barbara Nicolas[2], Jérôme I. Mars[2]

[1]LabSTICC (UMR CNRS 6285), ENSTA Bretagne (UEB), Brest, France.

[2]GIPSA-Lab (UMR CNRS 5216), Grenoble INP, Grenoble, France.

julien.bonnel@ensta-bretagne.fr

Résumé – En acoustique sous marine Ultra Basse Fréquence (UBF $<$ 200 Hz), un environnement océanique petit fond ($D <$ 200 m) se comporte comme un guide d'onde dispersif, dans lequel de nombreuses applications (inversion géoacoustique, localisation de source) considèrent la propagation de sources impulsionnelles (canons à air, explosions, baleines, ...). Comment obtenir une représentation temps-fréquence correcte des signaux correspondants? Ces signaux sont multicomposantes, chaque composante possède un retard de groupe non-linéaire et il n'existe pas de lien direct entre les différentes composantes. Cependant, le retard de groupe de chaque composante peut être approximé par une fonction puissance en $f^{-1/\beta}$, où β est l'invariant océanique (un scalaire qui résume la dispersion globale dans le guide d'onde). On peut alors définir une β-classe de représentations temps-fréquence adaptées au signal reçu. La méthode est appliquée avec succès sur des données réelles marines et permet une bonne représentation temps-fréquence des signaux considérés. Elle est robuste au bruit naturel de l'environnement marin, et à une erreur dans le choix de β.

Abstract – In Ultra low Frequency (UBF $<$ 200 Hz) underwater acoustics, a shallow water waveguide ($D <$ 200 m) is dispersive. When considering the propagation of impulsive sources (airgun, whale vocalization, ...), it is particularly challenging to obtain a good time-frequency representation of the signal received on a single hydrophone. Indeed, the signal is multicomponent with no direct link between the components, and each component has a nonlinear group delay. However, these group delays can be approximated with a power law $f^{-1/\beta}$, where β is the waveguide invariant (a scalar that characterizes the waveguide dispersive behavior). It is thus possible to define a β-class of time-frequency representations that are adapted to the received signal. This method is successfully validated on experimental data. It is robust to natural ambient noise and to a mismatch in the *a priori* choice of the β value.

1 Introduction

Ce papier porte sur l'application concrète des Représentations Temps-Fréquence (RTF) de la classe de puissance au contexte de l'Acoustique Sous Marine (ASM), et tout particulièrement pour l'étude des sons impulsionnels UBF propagés en environnement petit fond. Dans ce contexte, la propagation est décrite par la théorie des modes [1]. L'environnement agit comme un guide d'onde dispersif (chaque fréquence se propage à sa propre vitesse), et le signal reçu contient plusieurs composantes appelées modes. Chaque mode est une modulation non-linéaire de fréquence. L'analyse temps-fréquence (TF) de ce genre de signaux est un problème important au sein de la communauté ASM. Elle permet notamment de localiser des sources et/ou d'estimer l'environnement marin [2, 3].

L'analyse de la dispersion dans le domaine TF a été étudiée par la communauté de traitement du signal. Plusieurs approches ont été proposées, principalement au profit de l'ASM [4, 5, 6], mais également pour d'autres domaines applicatifs [7]. La majorité des méthodes proposées se basent sur un *a priori* physique modélisant le signal reçu. La clef du succès est alors d'utiliser au mieux l'*a priori* disponible tout en étant le moins sensible possible à une éventuelle erreur d'*a priori*.

Cet article propose une nouvelle approche TF pour l'analyse de la dispersion, basée sur l'utilisation des propriétés de covariance aux retards de groupe dispersifs (GDS : group delay shift) [8]. Comme les retards de groupe des modes varient avec le mode considéré, les RTF respectant la covariance aux GDS [1] ne sont pas naturellement adaptées au contexte de la propagation modale. Pour y remédier, nous présentons l'invariant océanique β, un scalaire qui résume la dispersion globale dans le guide d'onde. On montre que β peut être utilisé pour approximer le retard de groupe de chaque mode avec une fonction puissance. Cette approximation est utilisée pour définir une β-classe de puissance adaptée au signal reçu. La méthode est appliquée avec succès sur des données réelles marines et permet une bonne représentation TF des signaux considérés. Elle

1. Par soucis de simplicité, on parlera de GDS-covariance et on appellera GDS-classe la classe de RTF associée à la GDS-covariance.

est robuste au bruit naturel de l'environnement marin, et à une erreur dans le choix de β.

2 Représentations Temps-Fréquence covariantes à un retard de groupe dispersif

2.1 La GDS-covariance

On considère un signal $X(f)$ quelconque. On peut simuler son passage à travers un système/milieu passe-tout dispersif en lui appliquant l'opérateur

$$\mathbf{D}_{\alpha}^{(\xi)}X(f) = X(f)e^{-2\pi j\alpha\xi(f/f_0)}, \tag{1}$$

avec $\xi(f)$ une phase dispersive, f_0 une fréquence de référence fixe et α un nombre réel. Pour une phase ξ donnée, le paramètre α quantifie la quantité de dispersion sur le signal $\mathbf{D}_{\alpha}^{(\xi)}X(f)$.

Une RTF T appartient à la GDS-classe (i.e. est GDS-covariante) [8] si la RTF de $\mathbf{D}_{\alpha}^{(\xi)}X(f)$ correspond à la RTF de $X(f)$ décalée du retard de groupe $\alpha\tau(f) = \alpha\frac{d}{df}\xi(f/f_0)$:

$$T_{\mathbf{D}_{\alpha}^{(\xi)}X}(t,f) = T_X(t-\alpha\tau(f),f). \tag{2}$$

D'après le principe de l'équivalence unitaire, les RTF GDS-covariantes peuvent être obtenues à partir de l'opérateur de warping [2] dispersif

$$\mathbf{W}_{\xi}X(f) = \sqrt{\frac{d}{df}\xi^{-1}(f/f_0)}X\left(\xi^{-1}(f/f_0)\right). \tag{3}$$

En effet, une RTF $T^{(\xi)}$ covariante au GDS $\tau(f)$ peut s'obtenir à partir d'une RTF affine $T^{(A)}$ du signal warpé $\mathbf{W}_{\xi}X$ suivie par un un ré-échantillonnage du plan TF

$$T_X^{(\xi)}(t,f) = T^{(A)}_{\mathbf{W}_{\xi}X}\left(\frac{t}{f_0\tau(f)}, f_0\xi(f/f_0)\right). \tag{4}$$

2.2 La classe de puissance

Une sous classe de la GDS-classe est la classe de puissance [9]. Cette classe est adaptée à des signaux dont la phase ξ et le retard de groupe τ sont

$$\xi(f) = \xi_{\kappa}(f) = sgn(f)\,|f|^{\kappa}, \tag{5}$$

$$\tau(f) = \tau_{\kappa}(f) = \frac{\kappa}{f_0}\left|\frac{f}{f_0}\right|^{\kappa-1}, \tag{6}$$

avec κ le paramètre de puissance, et $sgn(f)$ la fonction qui donne le signe de f. A titre d'exemple, si on choisit que $T^{(A)}$ est un scalogramme, alors la RTF de la classe de puissance obtenue avec l'équation (4) est appelée powergramme.

2. le terme français exact est 'anamorphose', mais nous utiliserons l'anglicisme par soucis de concision.

Dans le contexte de la propagation modale, le signal reçu contient plusieurs modes. L'utilisation de la classe de puissance requiert que (i) chaque mode ait un retard de groupe à loi de puissance, (ii) pour un signal donné, le paramètre κ soit le même pour tous les modes, (iii) idéalement, la valeur de κ soit déterminée grâce à un *a priori* physique. Dans la suite, nous allons montrer qu'il est possible de remplir ces trois conditions.

3 Propagation acoustique en petit fond

3.1 Propagation modale

En petit fond, la propagation acoustique basse-fréquence est décrite par la théorie des modes [1]. Dans le cas d'une source impulsionnelle, le signal reçu $Y(f)$ après propagation sur une distance r contient N ondes dispersives appelées modes : $Y(f) = \sum_{m=1}^{N} A_m(f)e^{-j2\pi\phi_m(f)}$. La phase de chaque mode $\phi_m(f) = rk_m(f)$ dépend de la distance source/récepteur r et de l'environnement à travers les nombres d'onde $k_m(f)$.

A cause de la dispersion, chaque mode possède un retard de groupe non linéaire $\tau_m(f) = \frac{d}{df}\phi_m(f)$. Si les propriétés de l'environnement sont connues, on peut calculer $\phi_m(f)$ et il est possible de définir une RTF GDS-covariante parfaitement adaptée à un mode donné m. Cependant, excepté pour certains guides simplistes, la dispersion évolue non-linéairement entre les modes, et il est impossible de définir une RTF adaptée à l'ensemble du signal. La section suivante présente l'invariant océanique qui permet de résoudre ce problème.

3.2 Invariant océanique

Dans le contexte de la propagation modale guidée, le caractère dispersif du guide d'onde peut être résumé dans un unique scalaire β appelé invariant océanique [10]. Par nature, β décrit les interférences entre les modes. Cependant en 1999, D'Spain et Kuperman [11] ont donné une approximation de la dispersion d'un unique mode basée sur l'invariant océanique. Leur calcul peut être étendu pour approximer la phase d'un mode par

$$\phi_m(f) \simeq -\frac{r}{c}[f - \gamma_m f^{-\frac{1}{\beta}}], \tag{7}$$

avec c la vitesse moyenne du son dans l'eau et γ_m une constante dépendant uniquement de m. En considérant une source impulsionnelle et un unique récepteur, Gao et. al [12] ont montré qu'il est possible d'utiliser β pour compenser la dispersion en projetant le signal reçu $Y(f)$ sur les atomes $a(s) = e^{\frac{r}{c}[f - sf^{-\frac{1}{\beta}}]}$.

Dans la suite, nous généralisons le travail de Gao et montrerons qu'on peut se baser sur l'équation (7) pour définir une β-classe de puissance. Avant cela, notons que

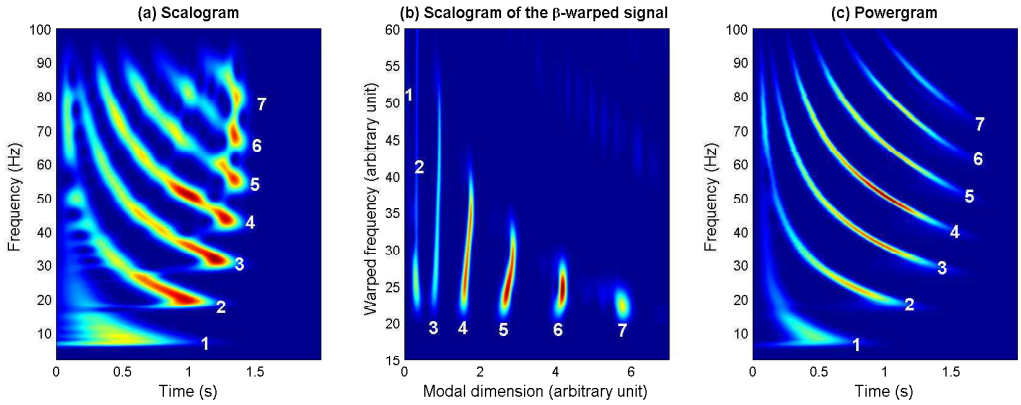


FIGURE 1 – Données simulées. (a) Scalogramme du signal reçu. (b) Scalogramme de la transformée de Fourier inverse du signal β-warpé. (c) β-powergramme. Le β-warping et le powergramme ont été calculés avec $\beta = 1.2$. Les chiffres blancs donnent les numéros des modes.

l'équation (7) est basée sur plusieurs approximations inhérentes au concept de l'invariant océanique. En particulier, l'invariant océanique n'est invariant que sous certaines conditions physiques, dont le lecteur curieux pourra trouver un résumé dans [1]. Notons simplement ici qu'à relativement grande distance, dans un guide d'onde qui varie peu avec la distance, et à des fréquences suffisamment basses pour que la refraction dans la colonne d'eau soit faible, l'invariant β est approximativement constant. En particulier, en environnement petit fond classique, $\beta \simeq 1$.

4 Représentations Temps-Fréquence de la β-classe de puissance

4.1 Classe de puissance et invariant océanique

L'origine de l'axe temporel peut être décalée telle que la phase des modes devienne $\phi_m(f) = \gamma_m \frac{r}{c} f^{-\frac{1}{\beta}}$. La classe de puissance avec le paramètre

$$\kappa = -1/\beta \tag{8}$$

est donc adaptée à tous les modes. On peut ainsi définir un β-opérateur de warping qui linéarise la phase de tous les modes. Les β-RTF associées, obtenues en utilisant l'équation (4), sont ainsi adaptées à l'ensemble du signal. On peut démontrer [9] que la transformée de Fourier inverse du signal warpé $\mathbf{W}_\beta X(f)$ présente les modes comme un groupe d'impulsions (voir figure 1). C'est une propriété particulièrement intéressante : dans le domaine warpé, les modes sont séparés et peuvent donc être aisément filtrés.

4.2 Exemple simulé

La méthodologie proposée est appliquée sur des données simulées réalistes qui reproduisent un environnement petit fond en été [1]. Le guide d'onde est constitué d'une couche d'eau avec un profil de célérité non-constant surplombant un plancher océanique stratifié (couche sédimentaire au dessus d'un socle). La distance source/récepteur est $r = 10$ km. La source est supposée parfaitement impulsionnelle (spectre plat de 0 à 100 Hz), et aucun bruit n'a été ajouté au signal reçu. Ainsi, les résultats obtenus sont plus facilement compréhensibles. La robustesse de la méthode face au bruit et à un signal source réaliste sera démontrée sur des données expérimentales dans la prochaine section.

Le scalogramme du signal simulé est présenté sur la figure 1(a). Les modes sont numérotés en blanc : on en distingue sept avec une relativement bonne résolution TF. Les modes de rang élévé (5,6,7) sont plus proches les uns des autres que les modes de rang faibles (1,2,3) et souffrent donc d'interférences TF. Le mode 1, qui a le contenu fréquentiel le plus bas, souffre d'une mauvaise résolution temporelle. La figure 1(b) présente le scalogramme de la transformée de Fourier inverse du signal β-warpé. Comme expliqué dans la section 4.1, les modes warpés sont impulsionnels. On remarque cependant que ce ne sont pas des impulsions parfaites, ce qui montre que l'invariant océanique, et particulièrement l'équation (7), est une approximation. La figure 1(c) montre le β-powergramme : les sept modes possèdent une excellente résolution TF. Le β-warping et le β-powergramme ont été calculés avec $\beta = 1.2$. Cette valeur a été choisie empiriquement pour obtenir de bonnes RTF.

Comme annoncé dans la section 3.2, la valeur de l'invariant océanique est souvent proche de 1, même si elle peut varier en fonction des conditions environnementales. La valeur utilisée pour calculer les β-RTF peut donc être définie empiriquement, ou choisie précisément grâce à une connaissance *a priori* des conditions environnementales. Dans les deux cas, il est important de remarquer que la représentation obtenue est relativement robuste à une erreur dans le choix de β. A titre d'exemple, choisir $1 < \beta < 1.5$ permet d'obtenir des β-powergrammes visuellement équi-

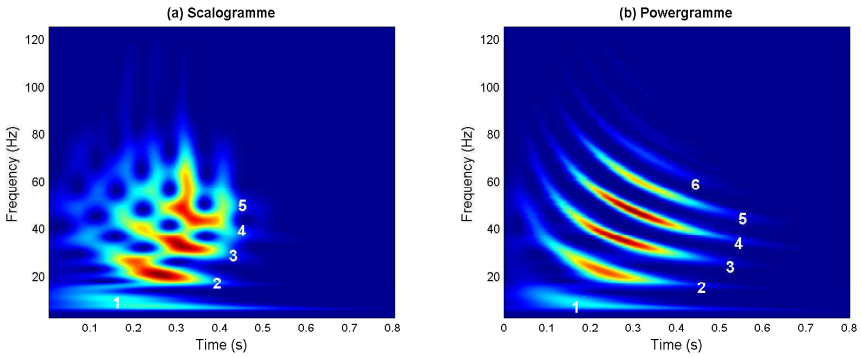


FIGURE 2 – Résultats expérimentaux sur les données Mer du Nord. (a) Scalogramme du signal reçu, (b) β-powergramme du signal reçu. Le powergramme a été calculé avec la valeur $\beta = 1$. Les chiffres blancs donnent les numéros des modes.

valent à celui présenté en sur la figure figure 1(c). En revanche, on perd en résolution TF (notamment pour les modes de rang élevé) si $\beta < 1$ ou $\beta > 1.5$.

5 Application à des données expérimentales marines

Cette section présente des résultats obtenus sur des données expérimentales. Le signal considéré a été enregistré en Mer du Nord par la Compagnie Générale de Géophysique dans un contexte de prospection sismique (la source considérée est un canon à air). La figure 2(a) présente le scalogramme du signal reçu. On distingue 5 modes, mais la résolution TF est pauvre et les modes interfèrent entre eux. Une analyse précise de la dispersion est impossible. La figure 2(b) présente le β-powergramme (avec β=1). On distingue maintenant 6 modes, avec une excellente résolution TF.

6 Conclusion

Les RTF de la classe de puissance, ou plus généralement les GDS-RTF, sont des RTF particulièrement adaptées pour analyser les signaux propagés dans des milieux dispersifs. Cependant, leur utilisation est limitée à des signaux monocomposantes, ou à des signaux multicomposantes dont les propriétés dispersives ne varient pas d'une composante à l'autre.

Dans le cadre de l'ASM, ce papier démontre que l'on peut utiliser les RTF de la classe de puissance pour représenter des signaux impulsionnels UBF propagés en milieu petit fond (guide d'onde dispersif multimodal). En effet, la notion d'invariant océanique β permet d'approximer la phase de chaque mode par une fonction puissance $f^{-1/\beta}$. La β-classe de puissance obtenue permet une bonne représentation de tous les modes (i.e. les composantes) contenus dans un signal après propagation. La méthode a été illustrée sur des données simulées et des données expérimentales enregistrées en Mer du Nord.

Références

[1] F. Jensen, W. Kuperman, M. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, 2nd ed. American Institute of Physics, New York, 2011.

[2] G. Potty, J. Miller, J. Lynch, and K. Smith, "Tomographic inversion for sediment parameters in shallow water," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 108, pp. 973–986, 2000.

[3] J. Bonnel, C. Gervaise, B. Nicolas, and J. Mars, "Single receiver geoacoustic inversion using modal reversal," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 1, pp. 119–128, 2012.

[4] C. Chen, J. Miller, G. Boudreaux-Bartels, G. Potty, and C. Lazauski, "Time-frequency representations for wideband acoustic signals in shallow water," in *OCEANS 2003. Proceedings*, vol. 5, 2003, pp. SP2903–SP2907.

[5] J. Hong, K. Sun, and Y. Kim, "Dispersion-based short-time Fourier transform applied to dispersive wave analysis," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 117, pp. 2949–2960, 2005.

[6] G. Le Touzé, B. Nicolas, J. Mars, and J. Lacoume, "Matched representations and filters for guided waves," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 57, no. 5, pp. 1783–1795, 2009.

[7] K. Xu, D. Ta, and W. Wang, "Multiridge-based analysis for separating individual modes from multimodal guided wave signals in long bones," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 57, no. 11, pp. 2480–2490, 2010.

[8] A. Papandreou-Suppappola, R. Murray, B. Iem, and G. Boudreaux-Bartels, "Group delay shift covariant quadratic time-frequency representations," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, no. 11, pp. 2549–2564, 2001.

[9] F. Hlawatsch, A. Papandreou-Suppappola, and G. Boudreaux-Bartels, "The power classes-quadratic time-frequency representations with scale covariance and dispersive time-shift covariance," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 47, no. 11, pp. 3067–3083, 1999.

[10] S. Chuprov, "Interference structure of a sound field in a layered ocean," *Ocean Acoustics, Modern State*, pp. 71–91, 1982.

[11] G. D'Spain and W. Kuperman, "Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 106, pp. 2454–2468, 1999.

[12] D. Gao, N. Wang, and H. Wang, "A dedispersion transform for sound propagation in shallow water waveguide," *Journal of Computational Acoustics*, vol. 18, no. 03, pp. 245–257, 2010.