

Synthèse temps-fréquence de signaux transitoires dans un contexte de tomographie acoustique océanique discrète

Lionel CROS¹, Cornel IOANA¹, Gwladys THEUILLON²

¹Laboratoire Extraction et Exploitation de l'Information en Environnements Incertains (E³I²)
2 rue François Verny, 29806 Brest, France

²Centre Militaire d'Océanographie (CMO)
13 rue Chatellier, BP30316 29603 Brest Cedex, France

Lionel.Cros@ensieta.fr, ioanaco@ensieta.fr, gwladys.theuillon@shom.fr

Résumé – Nous nous intéressons à synthétiser, dans un plan temps-fréquence, des signaux acoustiques répondant aux contraintes de la Tomographie Océanique Discrète (TOD), à partir de sources d'opportunité naturellement présentes dans le milieu. La synthèse optimale des signaux autorise la confusion entre une émission naturelle et artificielle, offrant l'avantage de contrôler les paramètres temporels, spatiaux et fréquentiels. L'intérêt et le potentiel de la méthode de synthèse proposée sont illustrés par un résultat obtenu dans un contexte de TOD, à partir de données réelles.

Abstract – In this paper, we describe a method to synthesize, in a time-frequency plane, acoustic signals adapted to the Discrete Oceanic Tomography (DOT) by using opportunity sources naturally present in the ocean. The optimal signal synthesis allows to make no difference between a natural and a synthetic emission and make possible the control of the temporal, spatial and spectral parameters. A result obtained from real underwater data illustrates the interest and the potential of the proposed synthesis method in a DOT context.

1 Introduction

L'objectif de la Tomographie Acoustique Océanique (TAO) est de déterminer, en mesurant les paramètres de propagation (retards, atténuations, etc.), les caractéristiques géoacoustiques de l'environnement dans lequel se propagent les ondes acoustiques [1]. A partir d'une expérimentation de tomographie constituée d'une phase d'émission, de propagation et de mesure du champ acoustique induit, les distorsions causées par la propagation permettent de retrouver par inversion, les propriétés d'intérêt du milieu.

Afin de réduire les effets nuisibles sur la faune marine et d'assurer une discrétion voulue par les opérations militaires, un domaine d'intérêt s'est développé autour du concept de la tomographie océanique passive qui fonctionne avec les signaux d'opportunité existants naturellement dans le milieu. Dans ce cas, l'émission de signaux est interdite.

Une étape de difficulté intermédiaire dans cette recherche de discrétion consiste à effectuer des émissions furtives. Ainsi intervient la notion de Tomographie Océanique Discrète (TOD) qui peut être définie comme un système de tomographie active dont le signal émis est choisi de façon à assurer la discrétion de l'émission.

Le principe de traitement des données d'un système de TOD peut s'illustrer par le schéma présenté FIG. 1. La première opération réalisée par un système de TOD est la *réception*, par un hydrophone, de signaux acoustiques provenant du milieu sous-marin environnant. Compte tenu de la diversité des signaux susceptibles d'être reçus (signaux à bande étroite, à large bande, émissions longues, impulsions courtes, etc.), une première étape d'*analyse* permet d'identifier les structures utiles pour la tomographie active. Le résultat de cette étape consiste

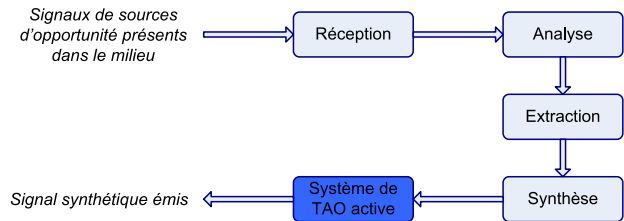


FIG. 1 – Organisation de la chaîne de traitement du signal dans un système de TOD.

principalement en la caractérisation de paramètres spécifiques aux signaux reçus. Ceux-ci permettront d'envisager l'*extraction* d'éléments exploitables pour la TOD et ensuite, d'effectuer la *synthèse* du signal performant pour la TAO qui possède un effet auditif similaire aux signaux présents dans le milieu. Par la suite, le signal synthétique fera office de forme d'onde pour le *système de TAO active*.

2 Procédure de synthèse proposée

L'identification des problèmes de traitement du signal associés à la TOD, a permis de formuler les exigences imposées aux sous-systèmes de TOD. Ainsi, une condition pour obtenir de bonnes performances pour le système de TAO est de sélectionner des structures temps-fréquence à produit BT important mais restant néanmoins à un niveau de complexité raisonnable [2, 3]. De plus, pour des raisons de discrétion, il est nécessaire d'avoir un maximum d'information pour produire le même effet auditif que le signal naturel. Aussi, les deux objectifs de la TOD qui sont d'assurer de bonnes performances

pour la TAO et un niveau de discrétion optimal, introduisent des exigences contradictoires.

Nous avons cependant identifié une approche capable de répondre à ce compromis. Il s'agit du concept «Auditory Modeling» (AM). Néanmoins, un certain nombre de difficultés liées à l'exploitation de l'information fournie par cet outil reste à résoudre. Il s'agit de l'extraction de l'information et de la synthèse du signal pour la TAO.

2.1 Analyse

La TOD utilise des signaux naturels se trouvant dans l'environnement sous-marin. Il s'agit principalement de sons émis par des cétacés, de bruits de bateaux, de vagues, etc. Étant donné que la majorité de ces signaux appartiennent à la bande spectrale auditive, le meilleur analyseur dont nous disposons, à l'heure actuelle, semble être l'oreille humaine. En effet, le système auditif humain possède de remarquables capacités pour détecter et reconnaître des sons de différentes origines et peut fonctionner correctement avec un faible rapport signal sur bruit. C'est la raison pour laquelle, l'AM constitue une solution satisfaisante pour répondre aux besoins du système de TOD.

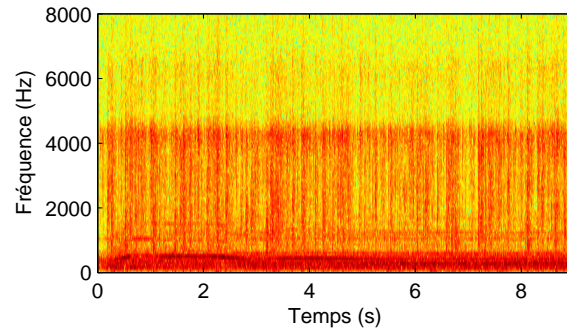
Ce modèle auditif complet, dont les aspects théoriques sont développés dans [4], est basé à la fois sur la physiologie des mammifères et sur la perception humaine. Il est constitué d'un ensemble de transformations (transformée en ondelettes, compressions non linéaires, etc.) qui fournit, dans un plan temps-échelle, une représentation fidèle de l'information préservée et amplifiée par le système auditif humain. Tous les modèles biophysiques du système auditif peuvent être réduits en 3 étapes principales : analyse, transduction et réduction. Si l'on ignore le lissage temporel et spatial, le modèle complet peut se résumer à l'expression suivante :

$$y(t; s) = \max \left(\frac{\partial}{\partial s} \left\{ g \left(\frac{\partial}{\partial t} \{x(t) *_t h(t; s)\} \right) \right\}, 0 \right) *_t \Pi_T(t)$$

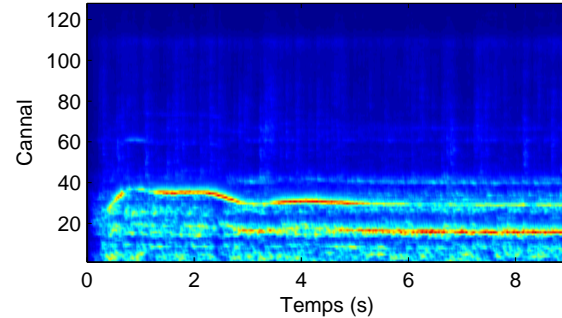
où t et s sont respectivement une variable temporelle et une variable spatiale, $x(t; s)$ le signal acoustique, $h(t; s)$ la réponse impulsionnelle du filtre de la cochlée localisée au pt s le long de celle-ci, $g(\cdot)$ une fonction non linéaire, $\Pi_T(t)$ la fonction porte de largeur T et $*_t$ la convolution par rapport à t .

La première étape du traitement auditif est représenté par une transformée en ondelette. Un banc de filtre de 128 canaux, uniformément espacé sur l'axe spatial, est construit par dilatation d'une ondelette mère construite par rapport à la réponse impulsionnelle du modèle biophysique de la membrane basilaire à la région correspondant approximativement à 1kHz. Chaque canal est ensuite indexé de 0 à 127.

La représentation temps-échelle issue de l'AM est appelée «Auditory Representation» (AR). Elle est constituée par une structure bidimensionnelle dans laquelle chaque ligne est associée à la sortie d'un filtre d'analyse. Cette représentation met en évidence plusieurs composantes énergétiques du signal perçues par l'oreille humaine. Grâce au système nerveux central, les détails qui ne sont pas représentatifs pour la compréhension du signal acoustique analysé sont ignorés. Ce processus de réduction de l'information est appelé «compression de l'information auditive». Cet effet est confirmé par les tests effectués sur un enregistrement de bruit de bateau illustré en FIG. 2. L'AR du signal acoustique (cf. FIG. 2(b)) contient moins de données que



(a) Spectrogramme.



(b) «Auditory Representation».

FIG. 2 – Comparaison entre le spectrogramme (a) et l'«Auditory Representation» (b) d'un signal acoustique réel.

le spectrogramme (cf. FIG. 2(a)). La transformée en ondelettes justifie la différence d'échelle entre les deux représentations.

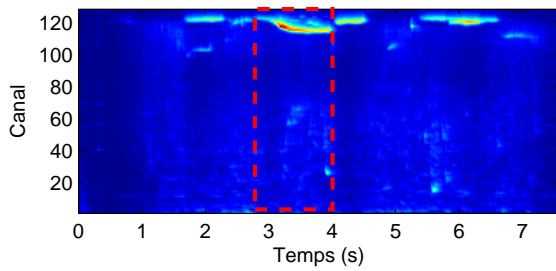
L'extraction d'informations à partir de l'AR garantit ainsi un niveau de discrétion optimal de l'émission des structures qui en sont extraites. Cet outil servira de référence pour effectuer la synthèse d'un signal acoustique discret.

2.2 Extraction

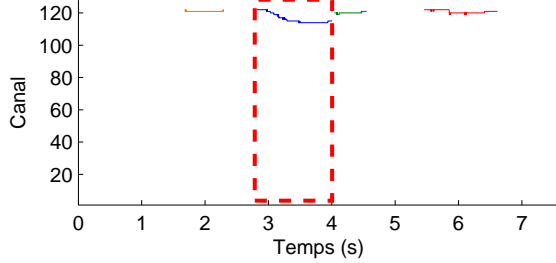
L'information auditive étant distribuée dans des bandes fréquentielles adjacentes, l'analyse indépendante des signaux dans chaque sous-bande n'est pas souhaitable. De plus, en raison de différents effets de propagation (multi-trajets, atténuations, artefacts, etc.), les structures présentes dans l'AR sont caractérisées par des pertes d'énergie. Nous avons donc besoin d'un recours à une technique performante de regroupement de l'information des bandes adjacentes. Pour ce faire, nous proposons l'utilisation d'une méthode basée sur l'algorithme de Viterbi afin d'estimer des lois de fréquence instantanée dans un plan temps-fréquence [5, 6]. L'algorithme de Viterbi peut être étendu comme un outil général pour grouper des parties du plan temps-fréquence appartenant à la même composante du signal.

Le critère retenu pour l'extraction de composantes temps-fréquence à partir de l'AR, consiste à sélectionner celles dont le produit BT est important. Ceci est équivalent à rechercher les composantes les plus énergétiques. Ce critère est intégré dans cet algorithme de détection qui va trier les chemins les plus énergétiques dans l'ordre décroissant.

La figure 3(b) montre le résultat obtenu par cet algorithme appliqué à un signal contenant des cris de dauphins [7]. Seules les 4 premières composantes temps-fréquences extraites de l'AR (cf. FIG. 3(a)), les plus énergétiques, sont représentées. Les 4



(a) «Auditory Representation».



(b) Les 4 premiers trajets détectés par l'algorithme temps-fréquence de Viterbi

FIG. 3 – Détection de composantes temps-fréquence à partir de l'AR d'un signal réel.

trajets détectés correspondent aux 4 principales structures mise en évidence par l'AM. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons à synthétiser la partie du signal encadrée en pointillés rouges (cf. FIG. 3).

2.3 Synthèse

La composante retenue, modélisée par l'algorithme précédent, est représentée en fonction des canaux de l'AR. Une modélisation polynomiale de la phase de celle-ci permet d'éviter les discontinuités inhérentes qui apparaissent dans le contexte du travail sur un nombre fini de sous bandes (cf. FIG. 3(b)) et permet de synthétiser un signal qui sera utilisé comme émission pour le système de TAO.

L'estimation polynomiale de la Loi de Fréquence Instantanée (LFI) s'effectue par le calcul des coefficients du polynôme d'approximation au sens des moindres carrés pour un ordre peu élevé ($P = 7$) :

$$LFI(t) = \sum_{k=0}^{P=7} a_k t^k \quad (1)$$

L'intégration de $LFI(t)$ par rapport au temps permet d'obtenir une estimation simple de la phase instantanée :

$$\phi(t) = 2\pi \sum_{k=0}^{P=7} \frac{a_k}{k+1} t^{k+1} \quad (2)$$

Maintenant le signal $s(t)$ peut être synthétiser simplement à partir de l'estimation de la phase instantanée, sous la forme d'un signal analytique :

$$s(t) = A e^{j\phi(t)} \quad (3)$$

où l'amplitude A est considérée constante et la phase $\phi(t)$ est définie par (2).

La figure 4 résume les opérations effectuées lors de la procédure de synthèse. Tout d'abord, le signal Acoustique Sous-Marin (ASM) reçu est analysé par l'AM pour fournir l'AR de

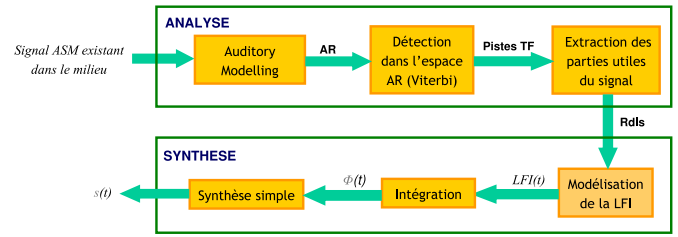


FIG. 4 – Organisation du système de traitement du signal proposé pour la TOD.

ce dernier. L'algorithme de Viterbi employé permet de détecter, à partir de l'AR, les pistes temps-fréquence les plus énergétiques. Celle dont le produit BT est le plus important est extraite et sa LFI estimée est ensuite modélisée puis intégrée par rapport au temps pour fournir une estimation de la phase instantanée de la composante retenue. Enfin, la synthèse sous la forme (3) permet l'obtention du signal synthétique $s(t)$.

Cette procédure de synthèse a été testée sur des données sous-marines réelles pour analyser ses performances dans le cadre de la TOD.

3 Résultats expérimentaux

Sous l'hypothèse d'une propagation par rayons acoustiques, la nature multi-trajets des arrivées constitue la principale distorsion observable par la mesure des temps de trajets et des atténuations de différents rayons acoustiques.

La phase d'inversion nécessite la connaissance de la réponse impulsionnelle (RI) du canal acoustique entre l'émetteur et le récepteur. Si l'on a P trajets, la RI peut s'écrire sous la forme :

$$h(t) = \sum_{n=1}^P \alpha_n \delta(t - \tau_n) \quad (4)$$

où $\delta(t)$ est l'impulsion de Dirac, α_n et τ_n représentent respectivement l'atténuation et le retard du $n^{\text{ème}}$ trajet.

Ainsi, le modèle de mesures disponibles est fourni par :

$$m(t) = h(t) * (r(t) + s(t)) + b(t) \quad (5)$$

$$= \sum_{n=1}^P \alpha_n r(t - \tau_n) + b(t) + \sum_{n=1}^P \alpha_n s(t - \tau_n) \quad (6)$$

où $r(t) + s(t)$ représente le signal propagé dans le canal par le bruit ambiant $r(t)$ auquel s'ajoute le signal synthétique émis $s(t)$. $b(t)$ est un bruit supposé blanc et stationnaire au sens large.

Connaissant le signal émis $s(t)$ et supposant que la mesure est constituée uniquement d'une arrivée décalée et atténuée, l'estimateur du maximum de vraisemblance du temps de propagation s'exprime simplement à partir de l'intercorrélation entre la mesure et le signal émis $\Gamma_{s,m}(\tau)$ (sortie du filtrage adapté). D'où l'estimation du temps de propagation :

$$\tilde{\tau} = \arg \max_{\tau} [\Gamma_{s,m}(\tau)] \quad (7)$$

Dans le cas où la mesure est constituée d'arrivées multiples, sous la condition que les arrivées soient toutes résolues, l'estimation des différents temps de propagation s'obtient grâce à (7) en cherchant le $n^{\text{ème}}$ maximum local correspondant au $n^{\text{ème}}$ trajet.

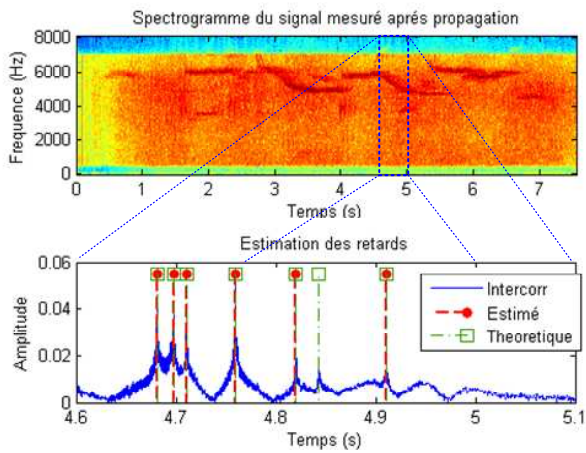


FIG. 5 – Estimation des temps de propagation obtenus par filtrage adapté.

Dans ce contexte, les performances de la TAO dépendent de l'efficacité de l'analyse et de la synthèse. Ainsi, l'extraction correcte de l'information contenue dans l'AR permet d'obtenir une bonne estimation de la RI du canal. L'évaluation des performances du système TOD s'effectue donc dans le contexte d'une configuration TAO active dont le signal émis est obtenu par l'architecture de synthèse proposée précédemment.

Nous considérons que la source d'opportunité se trouve à proximité du bateau sur lequel le système de traitement TOD est placé. Une fois le signal reçu, il est analysé à l'aide de l'AM. L'extraction des parties à produit BT important permettra la synthèse d'un signal avec des propriétés utiles pour la tomographie active. Par la suite, ce signal est émis dans la même bande de fréquence que le signal réel mais avec un décalage bien défini et contrôlé. Les caractéristiques de ce signal synthétique seront utilisées pour concevoir la procédure de filtrage adapté.

Afin de tester les performances d'estimation des temps de propagation du canal acoustique, nous avons utilisé un algorithme qui fournit un modèle numérique de la RI d'un canal à partir d'une configuration physique réelle. Cette RI est constituée de 7 chemins de propagation distincts.

La partie du signal encadrée en pointillés sur la figure 3, a été synthétisée. Le signal synthétique résultant, est ensuite inséré, après la partie extraite, avec une amplitude atténuée de moitié. Une estimation du signal reçu par le récepteur est obtenue par la convolution de la RI avec le signal précédent. La figure 5 donne une représentation graphique de l'estimation des retards de propagation du canal qui s'effectue par filtrage adapté basé sur l'intercorrélation (trait plein) entre le signal synthétique émis et le signal propagé dans le canal et mesuré par le récepteur. Les impulsions verticales indiquent les retards théoriques (carrés vides), et estimés (cercles pleins). Ainsi, il est possible, dans ce cas, d'estimer 6 retards sur 7 (cf. FIG. 5), tout en assurant une discrétion jugée satisfaisante par les membres de l'équipe travaillant sur cette approche.

4 Conclusions et perspectives

Nous avons proposé une architecture de traitement du signal pour la TOD. Le point clé de ce concept étant la simulation d'un système de tomographie active par l'émission de signaux

similaires à ceux existants dans le milieu.

La méthode développée permet de répondre deux objectifs fixés par la TOD qui sont d'assurer de bonnes performances pour la TAO et un niveau de discrétion optimal à l'émission sonore. Afin de répondre à ces exigences l'architecture de traitement est concentrée autour du concept Auditory Modelling. A partir de l'AR, une méthode basée sur l'algorithme de Viterbi permet d'extraire la composante dont le produit BT est le plus important. La modélisation polynomiale de la phase de cette composante permet de synthétiser le signal utilisé comme émission pour la TOA. Sous les hypothèses d'une propagation multi-trajets par rayons acoustiques, les tests effectués ont montré qu'il était possible d'estimer des temps de propagation nécessaires à la phase de déconvolution de la RI du canal sous-marin.

La procédure étant fonctionnelle pour des signaux comportant des structures à bande large, il reste maintenant à s'intéresser à d'autres sources d'opportunité importantes comme le bruit émis par des bateaux ou par des vagues. Pour ces derniers, il est difficile de faire apparaître des structures temps-fréquence cohérentes à produit BT important et de ce fait, la méthode synthétique mise en place n'est plus adaptée. Une solution envisagée consiste à analyser les phases des composantes de ces signaux afin de retrouver une cohérence de phase qui permettrait la réalisation d'une procédure de filtrage adapté.

Remerciements – Les auteurs ont plaisir à remercier le Centre Militaire d'Océanographie du SHOM pour cette étude réalisée dans le cadre du contrat de recherche CA/2003/06/CMO.

Références

- [1] W. Munk, P. Worcester, and C. Wunsch, *Ocean Acoustic Tomography*. New York : Cambridge, 1995.
- [2] 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*, vol. 21, pp. 324–346, 1999.
- [3] J. Le Gac, *Deux approches de l'inversion géoacoustique : Inversion par signaux large bande et Approche Variationnelle*. PhD thesis, Université de Toulon et de Var, April 2003.
- [4] X. Yang, K. Wang, and S. Shamma, "Auditory representations of acoustic signals," tech. rep., University of Maryland, 1991.
- [5] L. Stankovic, I. Djurovic, A. Ohsumi, and H. Ijima, "Instantaneous frequency estimation by using wigner distribution and viterbi algorithm," in *Proceeding of ICASSP*, vol. VI, pp. 121–124, April 2003. Hong Kong, China.
- [6] C. Cornu, I. Djurovic, C. Ioana, A. Quinquis, and L. Stankovic, "Time-frequency detection using gabor filter banks and viterbi based grouping algorithm," in *International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing ICASSP*, March 2005.
- [7] Cornell Lab of Ornithology, "Whale communication research." [en ligne]. Disponible sur : <<http://birds.cornell.edu/brp/SoundsBlueWhale.html>>.