

Filtrage des ondes par décomposition atomique multicanal d'antenne

Grégoire Le Touzé, Paul Cristini, Jacques Blanco

▶ **To cite this version:**

Grégoire Le Touzé, Paul Cristini, Jacques Blanco. Filtrage des ondes par décomposition atomique multicanal d'antenne. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00534629

HAL Id: hal-00534629
https://hal.science/hal-00534629

Submitted on 16 Nov 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

10ème **C**ongrès **F**rançais d'**A**coustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Filtrage des ondes par décomposition atomique multicanal d'antenne

Grégoire Le Touzé[1], Paul Cristini[1], Jacques Blanco[2]

[1] LMA, Marseille, {le_touze,cristini}@lma.cnrs-mrs.fr

[2] PhySeis Consultant, jacques.blanco@orange.fr

Le stockage de CO2 est une technologie naissante qui s'effectue dans des réservoirs géologiques dont la surveillance requiert l'étude de la micro-sismicité induite. Le contexte d'acquisition et de micro-sismicité (fracturation complexe, faibles séismes, phénomènes de dispersion, faibles nombre de capteurs etc.) nécessite le développement de nouvelles méthodes de filtrage des ondes. Nous proposons une méthode de filtrage basée sur la décomposition des signaux en ondes élémentaires (atomes). Les méthodes de décomposition atomique posent deux problématiques liées respectivement au choix de dictionnaire d'atomes à partir duquel on décompose le signal et à l'algorithme de décomposition. Notre objectif est de faire correspondre sans ambiguïté une onde physique à un atome du dictionnaire. Pour y répondre, nous utilisons un dictionnaire de chirplets sur 7 paramètres. Les paramètres permettent de régler le temps de décalage, la durée, la fréquence, la modulation et la forme d'enveloppe des atomes. Cette grande flexibilité permet de modéliser les phénomènes de dispersion ou d'évolution des formes d'onde. L'algorithme de décomposition proposé se décompose en deux étapes. La première consiste à étendre le Matching Pursuit à une configuration d'antenne afin d'exploiter l'information partagée entre les capteurs. Concrètement, les paramètres associés aux chirplets sont, ou non, autorisés à varier entre les composantes et les capteurs de l'antenne en fonction des hypothèses de propagation. La seconde étape optimise la décomposition par une procédure récursive dans le but de contourner les inconvénients inhérents au Matching Pursuit. Nous montrons enfin l'efficacité de cet algorithme sur des données micro-sismiques.

1 Introduction

Dans la majeure partie des applications d'acoustique et de sismique, le champ d'ondes est une combinaison d'ondes élémentaires (arrivées directes et réfléchies, modes normaux, ondes P et ondes S, ondes d'interface...). Les caractéristiques des ces ondes (temps d'arrivée, forme d'onde, amplitude et phase) sont utilisées dans le cadre de la résolution de problèmes inverses (localisation et caractérisation de source, estimation des paramètres d'environnement...). L'extraction des ondes a donc toujours été un problème central. De nombreuses techniques de filtrage existent. Elles consistent généralement à changer la base de projection du signal souvent liée à un domaine de représentation (temps, fréquence, temps-fréquence, fréquence-nombre d'onde, tau-p, changement de base par méthodes matricielles...) où les interférences entre les ondes sont limitées, puis à appliquer un filtre dans ce domaine. Ces méthodes sont limitées :
- le changement de représentation nécessite souvent une configuration de réception composée d'une antenne avec un grand nombre de récepteurs uniformément espacés. C'est le cas dans les domaines fréquence-nombre d'ondes [1], tau-P [2] et pour des méthodes matricielles [3] ;
- le nouveau domaine ne permet pas toujours d'éviter les interférences entre ondes. C'est particulièrement vrai pour les domaines temps, fréquence et temps-fréquence, y compris en utilisant des méthodes qui contournent les limitations intrinsèques [4].

Ces limitations empêchent le filtrage dans de nombreux cas. Par exemple, dans le cas de la surveillance micro-sismique de réservoirs de CO2, en dépit de la faible distance source-capteur, des phénomènes physiques complexes entrent en jeu (dispersion, réflexions multiples) et le nombre de capteurs est généralement faible (parfois 3 seulement). Les méthodes classiques s'avèrent alors inopérantes. Nous proposons ici une méthode pour pallier ces limitations. L'objectif consiste à faire correspondre sans ambiguïté une fonction élémentaire à une onde élémentaire. C'est pourquoi la méthode développée est une décomposition adaptative des signaux sur un dictionnaire étendu de fonctions élémentaires. Deux problématiques sont liées à ce type de méthode : le choix des fonctions élémentaires (appelées atomes) qui forment le dictionnaire et l'algorithme de décomposition qui calcule les coefficients de projection. Nous utilisons un dictionnaire de chirplets sur 7 paramètres développé par Bardaine *et al.* [5] qui permet une importante adaptabilité. Ce dictionnaire est décrit en section 1.1. L'algorithme de décomposition développé inclut un traitement Matching Pursuit multicanal suivi d'une étape d'optimisation. Il est décrit en section 2. Des résultats sur des données synthétiques sont présentés en section 3.

1.1 Dictionnaire de chirplets à 7 paramètres

Afin de respecter l'objectif formulé dans la section précédente (la projection doit associer sans ambiguïté une onde à un atome), on cherche un dictionnaire qui autorise les deux hypothèses suivantes :

- une onde peut être parfaitement décrite par un des atomes du dictionnaire.
- la combinaison de plusieurs ondes ne peut être décrite par un seul atome.

La première hypothèse nous impose de choisir un dictionnaire extrêmement flexible (et donc étendu). Nous choisissons un dictionnaire de chirplets sur 7 paramètres. Un chirplet est une fonction temporellement limitée qui correspond à un morceau de fonction modulée ("chirp"). Tout comme les ondelettes, les chirplets sont basés sur une fonction mère, généralement d'allure gaussienne. Les atomes de Gabor (2 paramètres : décalage temporel et fréquentiel de la fonction mère) et les ondelettes (2 paramètres : décalage temporel et d'échelle de la fonction mère) sont les dictionnaires de chirplets les plus répandus. [6] a introduit un 3ème paramètre : le coefficient de modulation linéaire.

Les ondes acoustiques ou sismiques peuvent varier par leur temps d'arrivée (en fonction du trajet pour une source donnée), leur fréquence (en fonction du spectre de la source et du filtrage du milieu), leur durée (en fonction de la source et de la dispersion), leur modulation linéaire et non-linéaire (en fonction de la source et de la dispersion), mais également par leur forme d'onde qui peut déterminer le type d'onde (onde de volume, onde guidée, onde d'interface...). La plupart de ces ondes rendent par exemple la symétrie de l'enveloppe peu réaliste. Par conséquent, les dictionnaires de Gabor, d'ondelettes ou de chirplets sur 4 paramètres ne s'avèrent pas suffisamment flexibles pour décrire complètement les phénomènes physiques mis en jeu en respectant les hypothèses formulées ci-dessus. C'est pourquoi nous choisissons le dictionnaire de chirplets normalisés $\mathcal{D}^{chirp} = \{h_i\}, \quad i = 1, ..., M$ introduit par Bardaine *et al.* dans un contexte sismique qui est décrit par 7 paramètres adaptés à la configuration physique : le temps de décalage τ_i et six paramètres morphologiques. Les 4 premiers f_i, o_i, $q1_i$ et $q2_i$ représentent respectivement la fréquence centrale, la durée (nombre d'oscillations), un coefficient de modulation linéaire et un coefficient de modulation non-linéaire. Les deux derniers paramètres $e1_i$ et $e2_i$ contrôlent la forme d'enveloppe en agissant respectivement sur la symétrie et la durée du plateau entre les parties droite et gauche de la gaussienne. Pour plus de détails, se référer à [5]. Notons finalement que plus le nombre de paramètres est grand et la taille des domaines d'évolution associés importante, plus l'algorithme sera coûteux en terme de temps de calcul, mais mieux les hypothèses seront respectées.

2 Algorithme développé

Une problématique ayant pour objectif d'associer sans ambiguïté un atome à une onde correspond à un problème de "décomposition parcimonieuse" car le nombre d'atomes impliqué est faible devant le nombre d'échantillons nécessaire à la description du signal. Ces dernières années, la communauté du Traitement du Signal s'est particulièrement intéressée à ces problématiques et un grand nombre d'algorithmes de décomposition parcimonieuse ont été développés. L'approximation optimale d'un signal par la superposition de K atomes à partir d'un dictionnaire incohérent (redondant) constitue un problème combinatoire rédhibitoire en terme de coût de calcul. D'une manière générale, un compromis est à faire entre la qualité de l'approximation et la relâche de contraintes. C'est pourquoi de nombreux algorithmes heuristiques ont été développés qui cherchent à approcher la solution optimale. Les atomes sélectionnés et les coefficients de décomposition associés dépendent des algorithmes. L'algorithme de Matching Pursuit (MP) développé par Mallat *et al.* [7] sélectionne itérativement une famille d'atomes. De nombreuses techniques ont été développées pour compléter ou améliorer le MP ("Basis Pursuit" [8], "Method of Frames" [9]...). Dans une configuration acoustique ou sismique complexe, ces méthodes échouent si l'on ne considère qu'un unique signal. L'originalité de la méthode proposée consiste à tirer avantage de l'information partagée par une même onde (correspondant au même phénomène physique) entre les capteurs et les composantes, conduisant à une extension du MP à une configuration d'antenne multi-composantes.

Nous détaillons tout d'abord la décomposition des signaux en une combinaison linéaire de K chirplets par le MP. Le signal considéré à la première itération est : $k = 0, \quad x_0 = x$. A chaque itération, le MP trouve la meilleure correspondance entre le signal et le dictionnaire $\mathcal{D}^{chirp} = \{h_i\}, \quad i = 1, ..., M$ en cherchant le maximum de la projection entre le signal et chacun des atomes :

$$|i_k| = \arg\max_i | < x_k, h_i > | \tag{1}$$

avec le coefficient A_k :

$$A_k =< x_k, h_{i_k} > \tag{2}$$

où x_k est le résidu après l'itération k :

$$x_k = x_{k-1} - A_{k-1} h_{k-1} \tag{3}$$

Après K itérations, le signal est décrit par :

$$x = \sum_{k=0}^{K-1} A_k h_{i_k} + R_K x \tag{4}$$

où $R_K x$ est le résidu. Cette procédure itérative est appliquée jusqu'à satisfaire des conditions préétablies. Le critère d'arrêt est généralement un pourcentage d'énergie de reconstruction donné entre le signal d'origine et l'approximation. Cela peut également être un nombre fixé d'itérations. Le MP est facile à implémenter et est l'un des algorithmes de décomposition les plus rapides. Notons que si nous utilisons le dictionnaire sur 7 paramètres, chaque atome sélectionné k est décrit par 9 paramètres : les 7 associés au chirplet h_k et les deux paramètres du coefficient de projection A_k (amplitude et phase). Pour prendre en compte l'information partagée par les capteurs et les composantes tout en laissant des degrés de liberté permettant de décrire la variation de l'onde le long des canaux, nous proposons un algorithme en deux étapes : un MP d'antenne multi-composantes, puis une étape d'optimisation.

$$F_k, \{M_{k,l}\}_{l=1}^{L}, \{V_{k,l,j}\}_{l=1,j=1}^{L,J} = \arg\max_F \sum_{l=1}^{L} \arg\max_M \sum_{j=1}^{J} \arg\max_V | < x_{k,l,j}, h_{F,M,V} > | \quad (5)$$

Etape 1 : Matching Pursuit d'antenne multi-composantes

Nous partons de l'hypothèse qu'une onde est présente sur l'ensemble de l'antenne. La pertinence de cette hypothèse dépend de la configuration de propagation et de réception. L'antenne peut éventuellement être divisée en plusieurs parties afin de rendre l'hypothèse valide. On effectue également l'hypothèse que les 9 paramètres de description d'une onde se répartissent dans la dimension capteur en deux classes de paramètres "fixes" et "variants indépendamment" le long de l'antenne. La même hypothèse est formulée sur la dimension composante de l'antenne mais la répartition des paramètres entre les 2 classes n'est pas nécessairement la même. Cependant la famille de paramètres "capteur-fixes" doit être inclue dans la famille "composante-fixes". La répartition des paramètres entre les classes dépend de la propagation dans le milieu complexe. Notons que les paramètres d'amplitude et de phase sont "variants" dans les deux dimensions de l'antenne. Finalement, les paramètres peuvent être divisés en trois classes : les paramètres "capteur et composante-fixes" F, les paramètres "capteur et composante-variants" V et les paramètres mixtes M qui sont "composante-fixes" et "capteur-variants". Le dictionnaire de chirplets tenant compte de cette indexation s'écrit : $\mathcal{D}^{chirp} = \{h_{F,M,V}\}$. En prenant l'exemple d'un contexte sismique, le chirplet décrivant une onde est supposé posséder les six mêmes paramètres morphologiques fixes le long de l'antenne de capteurs tandis que le temps et les paramètres de projection peuvent varier. Dans la dimension composante, seuls les paramètres de projection sont autorisés à varier. On a donc finalement : $F = \{\text{f,o,q1,q2,e1,e2}\}$, $M = \tau$ et $V = \{|A_p|, \arg(A_p)\}$.

Le MP d'antenne multi-composantes (MAMP) réalise un MP sur l'antenne en tenant compte des classifications des paramètres. Pour l'itération k, l'algorithme sélectionne le chirplet qui maximise la double somme de projection (*cf.* équation 5) où L est le nombre de capteurs et J celui de composantes pour chaque capteur. Le coefficient de projection est :

$$A_{F_k,M_{k,l},V_{k,l,j}} =< x_{k,l,j}, h_{F_k,M_{k,l},V_{k,l,j}} > \quad (6)$$

Le MAMP procède par itérations de la même manière que le MP. Les atomes extraits caractérisent parcimonieusement les ondes à l'aide des 9 informations constituées par les paramètres.

Etape 2 : Optimisation

Les interférences entre deux ondes indépendantes qui peuvent mettre en échec la décomposition, ne sont pas de même nature entre les capteurs et les composantes, faisant du traitement multicanal une procédure particulièrement bien adaptée à ce type de configuration.

	1	2	3	4	5
MP	17.2	45.5	16.1	23.6	49.4
MAMP	31.5	71.5	67.6	95.3	97.0
OMAMP	63.9	96.2	96.0	97.2	98.3

TABLE 1 – Pourcentage d'énergie de reconstruction en fonction de la méthode de décomposition

Pour améliorer encore cette décomposition, nous proposons une méthode d'optimisation récursive. Nous partons (*cf.* cycle 2 de la figure 1) du champ d'ondes initial (IW) sur lequel on applique le MAMP conventionnel sur 2 itérations pour déterminer une première approximation des deux premières ondes (notée W_1 et W_2). Pour optimiser la décomposition, on retire W_2 du champ initial IW formant le résidu $R_2 = IW - W_2$ et on effectue une itération MAMP sur ce résidu. On obtient une nouvelle estimation de l'onde W_1 qui s'avère meilleure. Ensuite, la nouvelle estimation de W_1 est soustraite de IW, et à nouveau une itération MAMP est appliquée sur le nouveau résidu ($R_1 = IW - W_1$), donnant à son tour une nouvelle et meilleure approximation de W_2. Ce processus est itéré jusqu'à ce que les gains de l'énergie du résidu $R_{12} = IW - W_1 - W_2$ ne décroissent plus, ce qui achève le Cycle 2 qui correspond à la décomposition de IW en deux atomes. Le processus peut être étendu de la même manière à un nombre fini d'atomes. Pour N atomes, le processus récursif est une généralisation du cycle 2 en remplaçant W_1 par le résidu du Cycle N-1 et W_2 par W_N (*cf.* figure 1). Après cette étape d'optimisation, toutes les composantes significatives du signal sont supposées avoir été extraites.

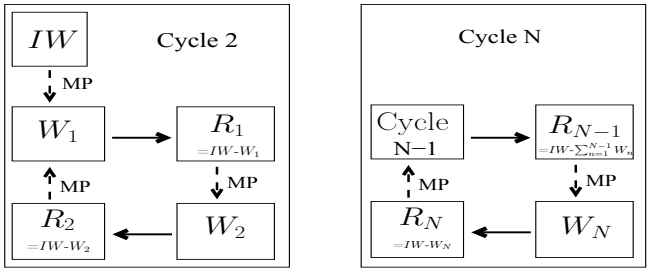


FIGURE 1 – Diagrammes des cycles récursifs (étape 2)

3 Applications

La méthode originale de décomposition du champ d'ondes décrite dans cet article a été appliquée sur un jeu de données sismiques synthétiques. Nous avons utilisé le logiciel OASES [10] dans une configuration simple où une source omnidirectionnelle émet un pulse dans un espace constitué de 3 couches homogènes. L'avantage apporté par l'utilisation d'un tel logiciel plutôt que des données réelles pour une première validation est que le code nous donne les solutions exactes des ondes élémentaires, permettant ainsi de quantifier et vérifier

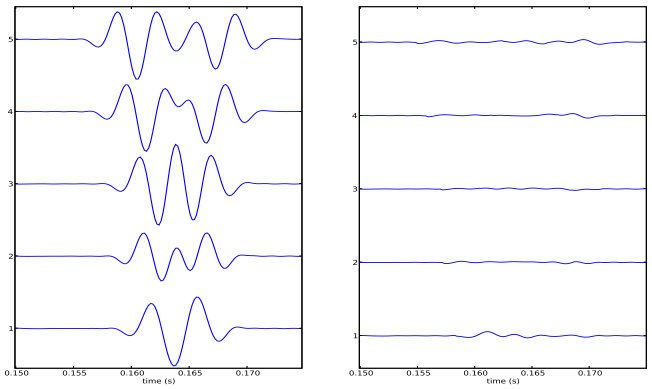


FIGURE 2 – Données synthétiques. Panel de gauche : données de la composante verticale. Panel de droite : résidus après la décomposition MAMP optimisée.

l'efficacité de la décomposition. Les signaux à filtrer ont été enregistrés à proximité de l'interface entre les couches 1 et 3. Il est composé de deux ondes de compression, "P-montante" et "P-descendante". Les capteurs 2 composantes (radiale et verticale) sont alignés verticalement et pas régulièrement. Entre les capteurs, certains paramètres d'une même onde peuvent varier de sorte que les deux ondes n'interfèrent pas de la même manière le long de l'antenne (*cf.* figure 2). Les performances de la décomposition ont été évaluées en comparant les pourcentages de reconstruction des véritables ondes avec les ondes extraites. Le tableau montre les variations de la moyenne sur les deux composantes et les deux ondes des cinq capteurs en fonction de la méthode utilisée (ici, MP, MAMP et MAMP optimisé). Grâce au traitement d'antenne et à l'étape d'optimisation, le MAMP optimisé améliore significativement l'efficacité du filtrage. L'étape d'optimisation est particulièrement efficace lorsqu'on est en présence d'interférences importantes entre les ondes (cas des traces 1 et 2). Lorsque les deux ondes interfèrent à tel point qu'elles semblent visuellement n'en former plus qu'une, on s'attend à ce que les performances soient inférieures, ce qui est le cas pour la trace 1 (trace du bas de la figure 2). Cependant, le MAMP optimisé conserve des résultats satisfaisants.

4 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une méthode originale de décomposition de champs d'ondes basée sur la décomposition en chirplets avec un algorithme en deux étapes. Cet algorithme réalise un traitement d'antenne afin d'améliorer les résultats obtenus par des méthodes conventionnelles. Les résultats montrent une large amélioration de l'efficacité de la décomposition, même lorsque les interférences sont très importantes. Au-delà des aspects de séparation, cette méthode permet également une compaction des informations utiles au stockage des signaux acoustiques ou sismiques.

Remerciements

Ce travail a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au sein du projet EMSAPCO2.

Références

[1] M. Bath, *Spectral Analysis in geophysics* (Elsevier, Amsterdam) (1974).

[2] J. Blanco and G. Canadas, "Wavefield decomposition by 3-D/3-C inversion process in tau-p domain", in *65th Conference & Exhibition, EAGE, Stavanger*, 103 (2003).

[3] E. Shang, "Source depth estimation in waveguide", J. Acoust. Soc. Am. **77**, 1413–1418 (1985).

[4] G. Le Touzé, B. Nicolas, J. Mars, and J.-L. Lacoume, "Matched representations and filters for guided waves", IEEE Trans. on Signal Processing **57**, 1783–1795 (2009).

[5] T. Bardaine, P. Gaillot, N. Dubos-Sallée, J. Blanco, and G. Sénéchal, "Characterization of seismic waveforms and classification of seismic events using chirplet atomic decomposition. Example from the Lacq gas field (Western Pyrenees, France)", Geophys. J. Int. **166**, 699–718 (2006).

[6] S. Mann and S. Haykin, "The Chirplet Transform : Physical considerations", IEEE Trans. on Signal Processing **43**, 2745–2761 (1995).

[7] S. Mallat and Z. Zhang, "Matching Pursuit with time-frequency dictionaries", IEEE Trans. on Signal Processing **41**, 3397–3415 (1993).

[8] S. Chen, D. Donoho, and M. Saunders, "Atomic decomposition by Basis Pursuit", Soc. for Ind. and Applied Math. **43**, 129–159 (2001).

[9] I. Daubechies, "Time-frequency localization operators : A geometric phase space approach", IEEE Trans. Inform. Theory **34**, 605612 (1988).

[10] H. Schmidt, "Seismo-acoustic fast field algorithm for range independent environments", User's Guide, SR 113, SACLANT ASW Research Centre, La Spezia, Italy **77**, 1413–1418 (1987).