

# Split Spectrum Modifié pour la détection d'échos ultrasonores multiples

Christophe CUDEL, Michel GREVILLOT, Jean-Jacques MEYER, Serge JACQUEY

Groupe Lab.El, Equipe EEA, EA 2332, Université de Haute Alsace  
61, rue Albert Camus, 68093 Mulhouse Cedex, France

[c.cudel@univ-mulhouse.fr](mailto:c.cudel@univ-mulhouse.fr), [m.grevillot@univ-mulhouse.fr](mailto:m.grevillot@univ-mulhouse.fr)  
[s.jacquy@univ-mulhouse.fr](mailto:s.jacquy@univ-mulhouse.fr), [jj.meyer@univ-mulhouse.fr](mailto:jj.meyer@univ-mulhouse.fr)

**Résumé** - Cette communication présente une variante de l'algorithme Split Spectrum Processing (SSP) adaptée pour la détection d'échos ultrasonores spéculaires dans un milieu biologique. Nous montrons en particulier comment augmenter la résolution de la méthode par la réduction des interférences dans le plan temps-fréquence du SSP. Ce plan est obtenu par découpage spectral avec un banc de filtres Gaussiens (équivalent à une transformée de Gabor).

**Abstract** - This paper presents an improvement of the Split Spectrum Processing algorithm applied to ultrasonic medical imaging. We propose to increase the resolution of the method by reducing the interferences in the time-frequency domain. The spectrum is split using a Gaussian filter bank (equivalent to a Gabor transform).

## 1. Introduction

L'imagerie ultrasonore est de plus en plus utilisée pour le diagnostic médical. Le passage d'une onde ultrasonore dans un milieu biologique aussi hétérogène que le corps humain produit des phénomènes de réflexions, diffusions, diffractions et absorptions. Les réflexions sont spéculaires si la taille du réflecteur est supérieure à la cellule de résolution de l'onde, diffuses dans la plupart des autres cas. Dans ce milieu très perturbé, il est particulièrement difficile de détecter les échos spéculaires, notamment ceux profonds présentant un faible rapport signal à bruit (SNR).

En contrôle non destructif des matériaux les signaux ne comportent généralement qu'un seul écho, et la détection par Split Spectrum Processing (SSP) est souvent utilisée [1]. Dans cette communication nous présentons une façon d'adapter le SSP à la détection d'échos spéculaires dans les milieux biologiques.

La première partie donne l'expression mathématique des signaux issus du SSP pour des échos à caractéristiques spectrales identiques. La seconde montre l'existence des phénomènes d'interférences entre deux échos proches et propose un changement d'échelle dans le domaine de Fourier afin d'améliorer leur détection. La dernière associe au SSP un outil de localisation de l'énergie dans le plan temps-fréquence pour des signaux bruités.

## 2. Détection d'échos spéculaires par SSP

### 2.1 Principe

La méthode de traitement du signal par SSP peut être vue sous différents aspects [2] [3]. Nous la considérons comme une méthode de détection dans son plan temps-fréquence.

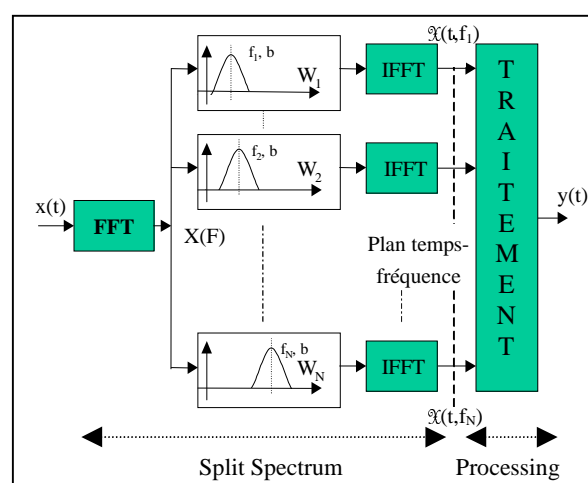


FIG. 1 : Principe du Split Spectrum Processing

Le SSP comporte deux étapes (fig. 1) :

- la première (SS) décompose un signal  $x(t)$  en  $N$  signaux à bandes étroites  $\mathfrak{X}(t, f_i)$ . Le découpage est effectué dans le domaine de Fourier à l'aide d'une série de filtres Gaussiens à largeur de bande fixe.

$$x(t) \xrightarrow{\text{Split Spectrum}} \mathfrak{X}(t, f_i) \quad (1)$$

$$\mathfrak{X}(t, f_i) = \Re_{\text{el}} \left[ \sum_{i=1}^N \left[ \text{TF}^{-1} (G(f - f_i) \cdot X(f)) \right] \right] \quad (2)$$

avec  $X(f) = \text{TF}[x(t)]$  (TF : Transformée de Fourier)  
et  $G(f - f_i) = G_i$  : fenêtre Gaussienne centrée à la fréquence  $f_i$ .

- la seconde (P) applique un algorithme sur cette représentation temps-fréquence  $\mathfrak{X}(t, f_i)$ , permettant la détection des échos spéculaires.

Jusqu'à présent le SSP n'était pas directement abordé sous l'aspect de sa représentation temps-fréquence. Le rôle de ce découpage spectral, par un banc de filtres à bandes étroites, est de décorrélérer l'écho du bruit [1]. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer qu'en exprimant le découpage spectral dans le domaine du temps (éq. 3), on fait apparaître qu'il est équivalent à une transformée de Gabor, dont on ne prendrait que la partie réelle.

$$G_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) g(\tau - t) e^{-2j\pi f(\tau - t)} d\tau \quad (3)$$

avec  $g(\tau)$  fenêtre Gaussienne duale de  $G(f)$ .

Différents algorithmes exploitent certaines propriétés statistiques des signaux à bande étroite afin de détecter les échos spéculaires [4]. Notre approche diffère dans le sens où nous traitons le plan temps-fréquence (éq. 2), dans le but d'y détecter tous ces échos quelles que soient leurs caractéristiques spectrales.

## 2.2 Split Spectrum

Considérons le cas d'un signal  $x(t)$  composé d'un seul écho  $s(t)$  modélisé par une fenêtre gaussienne  $g_0(t)$  pondérant une sinusoïde de fréquence  $f_0$  :

$$x(t) = s(t) = g_0(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) \quad (4)$$

Le découpage spectral de ce signal donne une représentation  $\mathfrak{X}(t, f_i)$  dans le plan temps-fréquence s'exprimant par la relation :

$$\mathfrak{X}(t, f_i) = \Re_{\text{el}} \left[ \sum_{i=1}^N \text{TF}^{-1} (P(f)) \right] \quad (5)$$

$$\text{avec } P(f) = \frac{1}{2} G(f - f_i) [G_0(f - f_0) + G_0(f + f_0)] \quad (6)$$

Comme la bande passante de la gaussienne  $G_0$  est beaucoup plus large que celle des gaussiennes  $G_i$  qui découpent le spectre, on peut considérer que les parties de  $G_0$  incluses dans les fenêtres  $G_i$  sont quasi constantes. En notant  $\alpha_i$  ces valeurs,  $\mathfrak{X}(t, f_i)$  peut s'écrire :

$$\mathfrak{X}(t, f_i) = \sum_i \alpha_i g(t) \cdot \cos(2\pi f_i t) \quad (7)$$

avec  $g(t) = \text{TF}^{-1}[G(f)]$

Cette relation montre qu'à l'instant  $t=0$  où l'amplitude de l'écho est maximale, le *Split Spectrum* produit dans le plan temps-fréquence des maxima d'amplitude  $\alpha_i$  alignés le long de l'axe des fréquences.

## 2.3 Processing

La détection de l'écho spéculaire consiste à rechercher un alignement de maxima selon l'axe des fréquences à un temps donné, c'est à dire trouver une cohérence de phase dans un ensemble de signaux à bande étroite. Différentes méthodes comme la moyenne linéaire ou non-linéaire, le seuillage de polarité et la moyenne géométrique peuvent être utilisées, mais l'algorithme qui donne les meilleurs performances pour un rapport signal à bruit supérieur à 0 dB en contrôle non destructif, est la minimisation absolue [4]. En revanche, il n'est pas tout à fait adapté à nos signaux, en partie à cause d'un glissement vers les basses fréquences des centroïdes des échos en fonction de la profondeur du milieu sondé. Nous proposons une nouvelle méthode, appelée Minimisation à Bande Mobile (MBM) [7]. Elle consiste à retenir à chaque instant, l'amplitude maximale des minima trouvés dans une fenêtre de taille  $B$  glissante entre les fréquences  $F_{\text{min}}$  et  $F_{\text{max}}$  de la bande d'analyse (Fig. 2). Idéalement  $B$  correspond à la bande passante de  $g_0(t)$ . Nous avons montré que cette opération est identique à l'opérateur "ouverture linéaire" de morphologie mathématique [5][7].

$$\text{MBM} \Leftrightarrow \max \left[ \min \left[ |\mathfrak{X}(t, f_n)|, \dots, |\mathfrak{X}(t, f_n + B)| \right] \right] \quad (8)$$

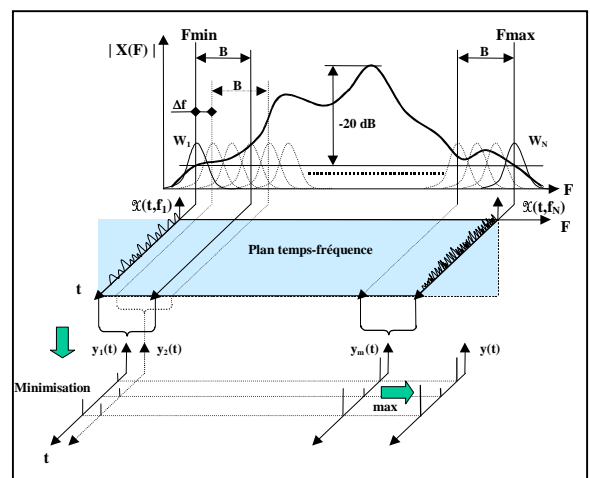


FIG. 2. : Principe de l'algorithme du MBM

### 3. SSP modifié pour la détection d'échos proches et bruités

#### 3.1 Echos proches

En s'intéressant maintenant au cas d'un signal  $x(t)$  à  $m$  échos identiques, on peut montrer que  $\mathfrak{X}(t, f_i)$  s'écrit :

$$x(t) = \sum_m s(t - t_m) \quad (9)$$

↓ Split Spectrum

$$\mathfrak{X}(t, f_i) = \sum_m \left( \sum_i \alpha_i g(t - t_m) \cdot \cos(2\pi f_i (t - t_m)) \right) \quad (10)$$

Dans chacune des bandes d'analyse la réponse est composée de la somme de signaux sinusoidaux pondérés par la  $TF^{-1}$  de la fenêtre gaussienne de découpage. Ces fenêtres, à bande passante étroite, ont une réponse temporelle assez longue et interfèrent entre elles dans le cas d'échos proches [6] (cf. figure 3b). Ces interférences détruisent l'alignement des maxima de chacun des échos proches, diminuant fortement la qualité de détection.

Pour atténuer ce phénomène il faut réduire la réponse temporelle de chaque Gaussienne. Il n'est bien sûr pas envisageable d'élargir la bande passante des fenêtres de découpage  $G_i$ , car on changerait les propriétés du SSP. En revanche on peut réaliser un changement d'échelle du signal par la dilatation d'un facteur  $n$  autour des fréquences centrales des Gaussiennes, ce qui entraîne une contraction dans le domaine du temps :

$$\begin{aligned} \mathfrak{X}_n(t, f_i) &= \mathcal{R}_{\text{éel}} \left[ \sum_{i=1}^N \left[ TF^{-1} (G(nf - f_i) \cdot X(nf)) \right] \right] \\ &= \sum_i \frac{\alpha_i}{n} g\left(\frac{t}{n}\right) \cdot \cos\left(2\pi f_i \frac{t}{n}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

Dans le cas des signaux discrets, il suffit de sur-échantillonner les spectres d'un facteur  $n$  autour de  $f_i$ , puis de faire correspondre la durée du signal  $x(t)$  avec celle obtenue après le changement d'échelle. De cette façon les interférences sont réduites de façon significative (figure 3c). Cette approche permet alors une bonne détection en l'absence de bruit.

#### 3.2 Echos bruités

En présence de bruit, la dilatation des fréquences provoque un accroissement artificiel des cohérences ce qui entraîne de fausses détections. Rappelons que la méthode du SSP détecte toutes les cohérences de phase dans le plan temps-fréquence  $\mathfrak{X}(t, f)$ , et ce indépendamment de l'énergie du signal. Pour distinguer le bruit des échos spéculaires, nous utilisons le spectrogramme de  $x(t)$  comme outil de localisation des zones à forte énergie dans  $\mathfrak{X}(t, f)$ .

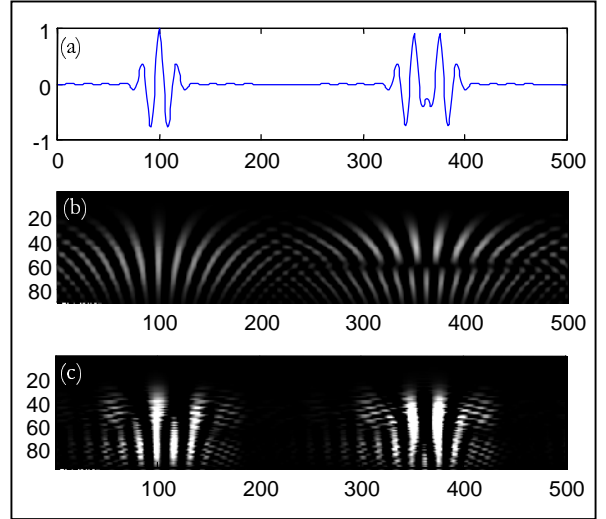


FIG. 3 : (a)  $x(t)$  avec échos en [100, 350, 375]  
(b)  $\mathfrak{X}(t, f)$  (Split Spectrum de  $x(t)$ )  
(c)  $\mathfrak{X}_5(t, f)$  (Split Spectrum avec  $n=5$ )

#### 3.3 Algorithme de détection : SSP modifié

La figure 4 résume l'algorithme de la détection, où  $\mathfrak{X}_5(t, f)$  représente le plan temps-fréquence après un sur-échantillonnage de 5. Le spectrogramme après seuillage par chapeau haut de forme [5], joue le rôle d'une région d'intérêt sur le résultat de l'algorithme du MBM. Finalement, cette fusion ne retient que les cohérences de phase ayant une énergie significative supérieure au bruit.

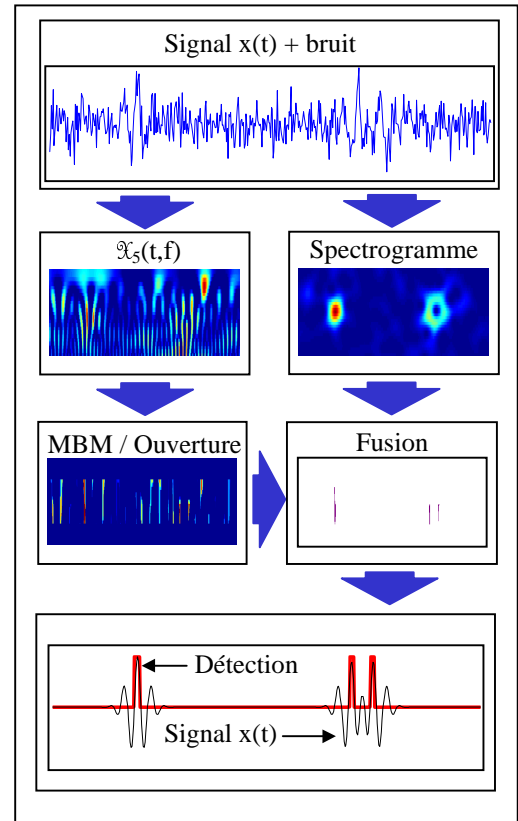


FIG. 4 : Détection sur un signal synthétique  $x(t)$  bruité (SNR de 6 dB)

## 4. Résultats expérimentaux

La figure 5a représente un signal ultrasonore RF pris sur le dos d'un patient et comprenant plusieurs échos spéculaires noyés dans du bruit. Les résultats obtenus avec notre méthode (Fig. 5c) sont comparés avec ceux du SSP sans changement d'échelle (Fig. 5b).

On peut observer que les détections sont plus nombreuses avec le SSP modifié. Elles reflètent plus précisément les couches traversées par l'onde ultrasonore. Cette méthode appliquée sur un ensemble de lignes permet largement de débruiter l'image de la zone scannée, ce qui facilite son interprétation.

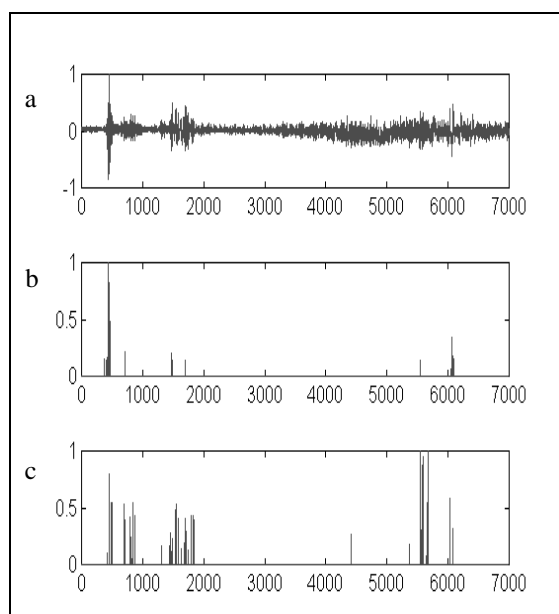


Fig. 5 : Comparaison des méthodes

- (a) : signal ultrasonore réel
- (b) : détection par SSP 'classique'
- (c) : détection par SSP modifié

## 5. Conclusion

Nous avons abordé l'algorithme du SSP sous l'aspect de sa représentation temps-fréquence. Cela nous a permis de vérifier l'intérêt de certaines méthodes basées sur une approche statistique, et de proposer l'algorithme de MBM pour la détection d'échos à caractéristiques spectrales différentes. Nous avons également montré comment réduire les interférences dans le plan temps-fréquence du SSP pour augmenter la résolution de la méthode. Enfin, nous avons vu l'utilité d'associer à cette détection un outil de localisation d'énergie.

Parallèlement à la détection, et suivant ces principes nous travaillons sur un algorithme de débruitage non-linéaire de signaux ultrasonores, qui permet d'améliorer les contrastes d'une image échographique, notamment dans le cas de signaux à faibles rapport signal à bruit.

## Références

- [1] Newhouse V.L, Bilgutay N.M, Sanije J and Furgason E.S, "Flaw to grain echo enhancement by SSP", *Ultrasonics*, 1982, p. 59-68
- [2] Li X., Bilgutay N.M and Murthy R., "Spectral histogram using the minimization algorithm - theory and applications to flaw detection", *IEEE Trans. On ultrasonics, Ferroelectrics and frequency control*, n°39, 1992, p. 272-284
- [3] Gustafsson M.G., "Toward adaptive Split Spectrum Processing", *IEEE symposium*, 1995, p. 729-732
- [4] Amir I., Bilgutay N.M, Newhouse V.L, "Analysis and comparison of some frequency compounding algorithms for the reduction of ultrasonic clutter", *IEEE Trans. On ultrasonics, Ferroelectrics and frequency control*, vol. 33, n°4, 1986, p. 402-411
- [5] Jean Serra, "Image Analysis and Mathematical Morphology", Vol1, p. 34, Academic Press, 1982
- [6] Xin J., Bilgutay N.M, "Detection and resolution of multiple targets using time frequency techniques", *IEEE Ultrasonics symposium*, 1994, p. 1133-1137
- [7] Grévillet M., "Quantification des mobilités inter et intra vertébrales au niveau du rachis lombaire par voies optique et ultrasonore. Détection des échos spéculaires par traitements du plan temps-fréquence". Thèse doctorat de l'Université de Haute-Alsace, spécialité EEA, Juin 1999.