



## ETUDE DES SIGNAUX ASM LARGE BANDE MODULES PAR LA METHODE DE LA CORRELATION SPECTRALE

Paul DEGOUL

THOMSON SINTRA ASM  
1, avenue Aristide Briand, 94117 ARCUEIL Cedex, FRANCE

**Résumé :** En acoustique sous-marine (ASM), la description des signaux modulés est d'un grand intérêt pour détecter et classifier les bâtiments. La méthode généralement utilisée, connue sous le nom de DEMON (demodulation of noise), consiste à effectuer un filtrage passe-bande du signal, suivi d'une détection d'enveloppe, et de réaliser alors une analyse spectrale pour détecter des raies. La principale limite de cette méthode réside dans le fait que la bande analysée (bande passante du filtre), est sélectionnée de manière arbitraire, ce qui conduit à une caractérisation non optimale. La méthode de la corrélation spectrale a été appliquée à des signaux ASM afin d'extraire des paramètres de modulation. La corrélation spectrale permet de représenter les signaux dans un plan fréquence/fréquence cyclique, où l'axe des fréquences décrit la bande analysée, et celui des fréquences cycliques les rythmes de modulation. Nous avons considéré tout d'abord des signaux synthétiques, puis des bruits rayonnés par le système de propulsion de bâtiments de commerce. On retrouve avec précision la position et la largeur des bandes fréquentielles modulées, ainsi que leurs rythmes de modulation.

**Abstract :** In the field of underwater acoustics, describing modulated wide band signals is very interesting in order to detect and classify ships. Generally, modulation features are extracted by a method called DEMON (demodulation of noise), which consists in band-pass filtering the signal, performing quadratic detection, and finally performing a spectral analysis to detect spectral lines. The major drawback of the DEMON method is that the analysed frequency band is arbitrarily chosen, so that the extraction of modulation is not optimum. In this paper, the spectral correlation method is applied to underwater acoustic signals in order to extract modulation features. Spectral correlation allows to represent signals in a frequency/cyclic frequency plane, where the frequency axis describes analysed frequency, and the cyclic frequency axis describes modulation rates. Firstly, we look at synthetic signals, and secondly, at noises emitted by propulsion system of merchant ships. We find, with accuracy, position and width of modulated frequency bands, and their modulation rates.

### INTRODUCTION:

En acoustique sous-marine (ASM), l'étude des bruits large-bande modulés rayonnés par les bâtiments tels les bruits de ligne d'arbre, bruits de pales d'hélice, bruits de cavitation... présente un grand intérêt en termes de détection et de classification.

La technique généralement utilisée pour extraire ces modulations est connue sous le nom de méthode DEMON (demodulation of noise). Elle consiste à effectuer un filtrage passe-bande du signal, sélectionnant la zone fréquentielle à analyser, suivi d'une détection d'enveloppe (élévation au carré du signal, puis filtrage passe-bas). Le signal ainsi recueilli est alors traité par analyse spectrale classique (par exemple: transformation de Fourier), en vue de détecter des raies. Une limite importante de cette méthode réside dans le fait que les bandes fréquentielles analysées sont découpées de manière arbitraire (par octave, par exemple), ce qui réduit l'efficacité du traitement.

La description, par d'autres approches, des modulations périodiques des signaux large bande a été entreprise. Dans ce cadre, la théorie de la corrélation spectrale, développée au cours de ces dernières années par William A. GARDNER [1, 2, 3], et reposant sur l'étude des signaux cyclosta-

tionnaires, présente de nombreux avantages.

### SIGNAUX CYCLOSTATIONNAIRES:

Un signal contenant une composante sinusoïdale à la fréquence  $\alpha$ , présentera une densité spectrale de puissance (DSP) contenant une raie spectrale à cette fréquence  $\alpha$ . On dit alors qu'un tel signal présente une périodicité de premier ordre à la fréquence  $\alpha$ . De telles périodicités sont détectées par les techniques classiques d'analyse spectrale. Certains signaux contiennent des périodicités ne donnant pas directement de raies spectrales, mais peuvent en présenter après avoir subi une transformation non linéaire invariante en temps. En particulier, on dit qu'un signal  $x(t)$  contient une périodicité de deuxième ordre à la fréquence  $\alpha$ , si et seulement si, il existe une transformation quadratique invariante en temps (QIT) de  $x(t)$  en  $y(t)$ , telle que  $y(t)$  contienne une périodicité de premier ordre à la fréquence  $f = \alpha$ . Un signal contenant des périodicités de deuxième ordre est dit **cyclostationnaire** de deuxième ordre [1, 4, 5].

On peut alors montrer que la qualité de cyclostationnarité est caractérisée par la **fonction d'autocorrélation cyclique** [1, 5]  $R_x^\alpha(\tau)$  définie par:

$$(1) \quad R_x^\alpha(\tau) = \langle x(t + \tau/2)x^*(t - \tau/2)e^{-2i\pi\alpha t} \rangle$$



où  $\langle . \rangle$  est l'opération de moyennage temporel (hypothèse d'ergodisme):

$$(2) \quad \langle . \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (.) dt$$

et  $\alpha$  est appelée **fréquence cyclique**. Pour  $\alpha = 0$ , on obtient la fonction d'autocorrélation classique.

### CORRELATION SPECTRALE:

La fonction d'autocorrélation cyclique exploite les redondances dans le spectre du signal analysé [1, 3, 5]. En effet, l'expression (1) peut être mise sous la forme:

$$(3) \quad R_x^\alpha(\tau) = \langle [x(t + \tau/2)e^{-i\pi\alpha(t+\tau/2)}] [x(t - \tau/2)e^{i\pi\alpha(t-\tau/2)}]^* \rangle$$

On reconnaît alors la fonction d'intercorrélation conventionnelle entre deux signaux  $u(t)$  et  $v(t)$ , qui sont des versions de  $x(t)$  décalées en fréquence respectivement de  $+\alpha/2$  et  $-\alpha/2$ :

$$(4) \quad R_x^\alpha(\tau) = \langle u(t + \tau/2)v^*(t - \tau/2) \rangle$$

où :

$$u(t) = x(t)e^{-i\pi\alpha t}$$

$$v(t) = x(t)e^{i\pi\alpha t}$$

Ces relations nous enseignent que  $x(t)$  contient des périodicités de deuxième ordre (c'est à dire que  $R_x^\alpha(\tau)$  est non identiquement nul en  $\tau$  pour des fréquences cycliques  $\alpha \neq 0$ ), si et seulement si, les versions de  $x(t)$  décalées fréquentiellement (c'est à dire  $u(t)$  et  $v(t)$ ) sont corrélées.

De la même façon que la relation de Wiener relie la fonction d'autocorrélation et la DSP d'un signal, la fonction de **corrélation spectrale** (ou densité de corrélation spectrale)  $S_x^\alpha(f)$  peut être définie en réalisant une transformation de Fourier (sur la variable  $\tau$  qui donne la variable  $f$  dans l'espace dual) de la fonction d'autocorrélation cyclique  $R_x^\alpha(\tau)$ :

$$(5) \quad S_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x^\alpha(\tau) e^{-2i\pi f\tau} d\tau$$

Cette expression est appelée relation de Wiener cyclique, et se ramène à la relation de Wiener classique pour  $\alpha = 0$ . La fonction de corrélation spectrale est encore équivalente à l'interspectre de  $u(t)$  et  $v(t)$ .

Afin d'illustrer ces définitions et relations, considérons le cas général de la modulation d'amplitude, couramment rencontré en théorie de la communication [5]. Les relations de modulation produisent des redondances dans le spectre des signaux, redondances pouvant directement être mises en évidence par la corrélation spectrale. Soit  $a(t)$  un signal basse fréquence ne contenant pas de raie spectrale, et ayant pour DSP  $S_a(f)$  (Fig. 1). Le signal modulé en amplitude  $x(t)$  est alors obtenu en multipliant une sinusoïde par le signal  $a(t)$ :

$$(6) \quad x(t) = a(t)\cos(2\pi f_0 t + \theta)$$

La DSP  $S_x(f)$  de ce signal est donnée par la relation suivante:

$$(7) \quad S_x(f) = \frac{1}{4}[S_a(f + f_0) + S_a(f - f_0)]$$

Elle ne contient donc aucune raie spectrale (Fig. 2). Les relations (1) et (5) nous permettent d'obtenir la fonction de corrélation spectrale de  $x(t)$ :

$$(8) \quad S_x^\alpha(f) = \begin{cases} \frac{1}{4}[S_a(f + f_0) + S_a(f - f_0)] & \text{si } \alpha = 0 \\ \frac{1}{4}S_a(f)e^{\pm 2i\theta} & \text{si } \alpha = \pm 2f_0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La corrélation spectrale est représentée (en module) sur la figure 3. Il apparaît à la fréquence cyclique  $\alpha = 2f_0$  (c'est à dire à deux fois la fréquence de la porteuse dans la relation de modulation), la DSP  $S_a(f)$  du signal  $a(t)$  (porteur de l'information).

### SIGNAUX ASM:

En acoustique sous-marine, les bâtiments rayonnent de nombreux types de signaux large bande modulés périodiquement, en particulier ceux liés à la ligne d'arbre ou à l'hélice. Des méthodes d'analyse temps-fréquence (analyse de Fourier à court terme ou transformation de Wigner-Ville), nous ont permis de constater que ces signaux sont composés de bandes fréquentielles (de largeur allant de la dizaine de Hz à plusieurs kHz) modulées en amplitude au rythme du phénomène physique qui les génère, c'est à dire le rythme de la ligne d'arbre (Shaft Rate = SR), ou le rythme des pales de l'hélice (Blade Rate = BR). Typiquement ces rythmes de modulation sont de quelques Hz. Par exemple, pour un bâtiment ayant une rotation de ligne d'arbre à 60 t/mn, le SR est 1 Hz, et le BR est de 4 Hz pour une hélice à 4 pales.

### SIGNAUX SYNTHETIQUES:

Ces signaux ASM peuvent se modéliser par la relation générale de modulation d'amplitude suivante:

$$(9) \quad x(t) = a(t)p(t)$$

où  $a(t)$  est un bruit large bande (avec une fréquence centrale  $f_c$  de l'ordre du kHz), et  $p(t)$  un signal périodique quelconque (avec une fréquence fondamentale  $f_0$  de l'ordre du Hz). Le signal  $p(t)$  admet donc une décomposition en série de Fourier:

$$(10) \quad p(t) = \sum_{\beta} P_{\beta} e^{2i\pi\beta t}$$

Les valeurs  $P_{\beta}$  forment la série des coefficients de Fourier complexes du signal  $p(t)$ . La relation (1) nous permet d'obtenir la fonction d'autocorrélation cyclique de  $x(t)$ :

$$(11) \quad R_x^\alpha(\tau) = \sum_{\beta} \sum_u P_u P_{\beta-u} e^{-i\pi\tau(\beta-2u)} R_a^{\alpha-\beta}(\tau)$$



La relation (5) nous donne alors la corrélation spectrale:

$$(12) \quad S_x^\alpha(f) = \sum_{\beta} \sum_u P_u P_{\beta-u} S_a^{\alpha-\beta}(f-u+\beta/2)$$

Si on ajoute de plus l'hypothèse de stationnarité pure de  $a(t)$ , on obtient:

$$(13) \quad S_x^\alpha(f) = \sum_u P_u P_{\alpha-u} S_a(f-u+\alpha/2)$$

Cette relation nous enseigne que la corrélation spectrale pourra posséder des composantes à des fréquences cycliques  $\alpha$  pour lesquelles il existe des fréquences  $u$  telles que  $P_u P_{\alpha-u} \neq 0$ . Il est très intéressant de noter que, le signal  $a(t)$  étant large bande et  $p(t)$  étant périodique quelconque, la corrélation spectrale sera différente de 0, en particulier, pour des valeurs de  $\alpha$  multiples de  $f_0$ . De plus, en faisant l'hypothèse (qui est valide pour les signaux ASM considérés)  $f_c \gg f_0$ , la valeur de la corrélation spectrale pour les fréquences cycliques  $\alpha$  précédentes, est égale à la densité spectrale de puissance  $S_a(f)$  de  $a(t)$  pondérée par la somme complexe  $\sum_u P_u P_{\alpha-u}$ . La corrélation spectrale permet de représenter les signaux dans un plan fréquence/fréquence cyclique, où l'axe des fréquences décrit la bande analysée, et celui des fréquences cycliques les rythmes de modulation.

Considérons le cas simple d'un signal  $x(t)$  pouvant s'écrire sous la forme (9), avec  $a(t)$  constitué d'une bande de bruit centrée sur 1000 Hz et de largeur 200 Hz (bruit blanc gaussien filtré dans la bande 900 Hz - 1100 Hz), et d'une autre bande centrée sur 3000 Hz et de largeur 200 Hz (bruit blanc gaussien filtré dans la bande 2900 Hz - 3100 Hz). La modulation d'amplitude est de la forme  $p(t) = 1 - I \cos(2\pi f_0 t)$  avec  $f_0 = 4$  Hz, et  $I$  indice de modulation = 0,4. On ajoute à ce signal un bruit blanc gaussien, tel que le rapport signal sur bruit (RSB) soit de -3,2 dB pour la première bande modulée, et de -9,2 dB pour la deuxième. La figure 4 représente la corrélation spectrale du signal ainsi défini (échelle des niveaux de gris en dB). L'estimateur utilisé est le périodogramme cyclique à lissage fréquentiel [5, 6]. On distingue nettement la DSP  $S_a(f)$  de  $a(t)$  pour la fréquence cyclique  $\alpha = 4$  Hz.

Nous avons alors simulé le bruit émis par une hélice à quatre pales. Pour cela, nous avons construit un modèle de la forme (9), où  $a(t)$  est une bande de bruit centrée sur 2500 Hz et de largeur 2500 Hz (bruit blanc gaussien filtré dans la bande 1250 Hz - 3750 Hz), et  $p(t)$  une fonction périodique ayant la forme, sur une période, de quatre "dents de scie" dont la première a un niveau plus élevé que les trois suivantes. Ceci permet de définir un SR (ayant ici pour valeur 1,75 Hz, ce qui correspond à une hélice évoluant à 105 t/mn), et un BR égal à 4 SR. Pour accroître encore le réalisme de la modulation, un bruit blanc est ajouté à la bande modulée (RSB = -3 dB). La figure 5 présente la corrélation spectrale du signal résultant. On retrouve parfaitement le BR (= 7 Hz), le SR (= 1,75 Hz), ainsi que certains rythmes harmoniques du SR.

## SIGNAUX REELS:

Dans un deuxième temps, la corrélation spectrale a été utilisée pour décrire des signaux réels. Nous présentons ici quelques résultats obtenus sur deux types de bruits rayonnés par des bâtiments de commerce.

Tout d'abord, la figure 6 représente la corrélation spectrale d'un bruit probablement émis par l'arbre de puissance. On distingue nettement une bande de bruit centrée sur 500 Hz, de largeur approximative 200 Hz, et modulée à une fréquence de 3 Hz qui correspond à une vitesse de rotation de la ligne d'arbre de 180 t/mn.

Le deuxième signal considéré est le bruit émis par les pales d'une hélice. La figure 7 présente la corrélation spectrale de ce bruit. Le BR est nettement marqué à 4 Hz, et on peut discerner le SR à 1 Hz. On en déduit alors que l'hélice possède 4 pales, et évolue à 60 t/mn.

## CONCLUSION:

Les exemples décrits montrent l'intérêt de la corrélation spectrale pour l'extraction de caractéristiques de modulation sur des signaux ASM.

En particulier, la corrélation spectrale donne accès de manière précise à la position et la largeur des bandes fréquentielles modulées, ainsi qu'aux rythmes de modulation de ces bandes.

L'extraction de tels paramètres peut très certainement être un élément déterminant en termes de détection, mais aussi de classification de bruiteurs.

## Remerciements:

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une étude de la DRET (Direction des Recherches, Etudes et Techniques - Paris).

## Références

- [1] W.A. Gardner. The spectral correlation theory of cyclostationary time-series. *Signal Processing*, 11(1):13-36, July 1986.
- [2] W.A. Gardner. Signal interception: a unifying theoretical framework for feature detection. *IEEE Trans. on Commun.*, 36(8):897-906, Aug. 1988.
- [3] W.A. Gardner. Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals. *IEEE Signal Processing Magazine*, 14-36, Apr. 1991.
- [4] W.A. Gardner. *Introduction to random processes with applications to signals and systems*. MacGraw-Hill, second edition, 1990.
- [5] W.A. Gardner. *Statistical spectral analysis: a nonprobabilistic theory*. Prentice-Hall, 1988.
- [6] W.A. Gardner. Measurement of spectral correlation. *IEEE Trans. on ASSP*, ASSP-34(5):1111-1123, Oct. 1986.

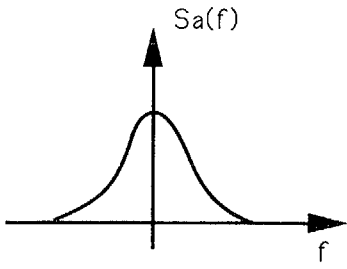


Figure 1

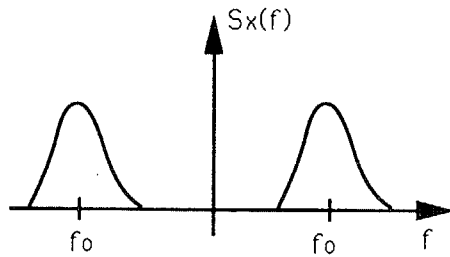


Figure 2

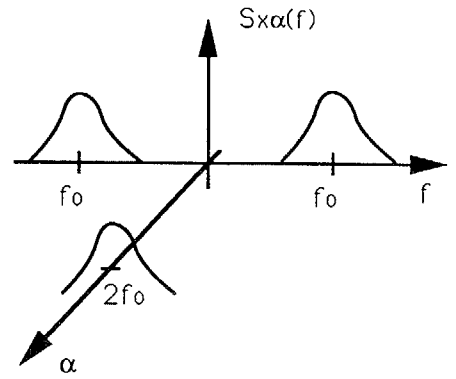


Figure 3

*CORRELATION SPECTRALE*

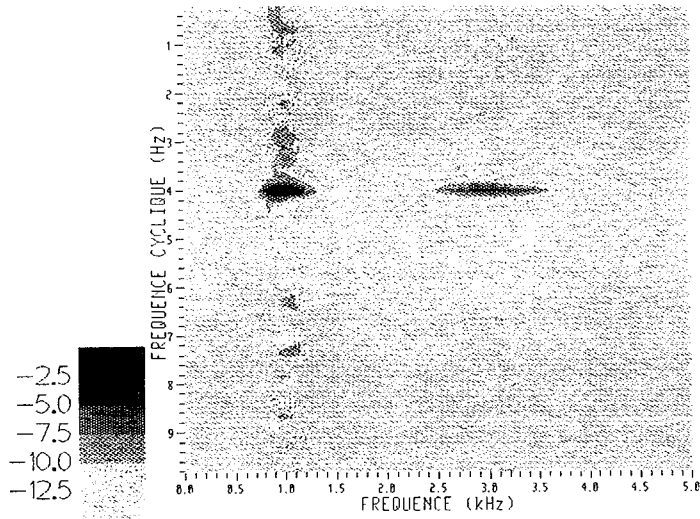


Figure 4

*CORRELATION SPECTRALE*

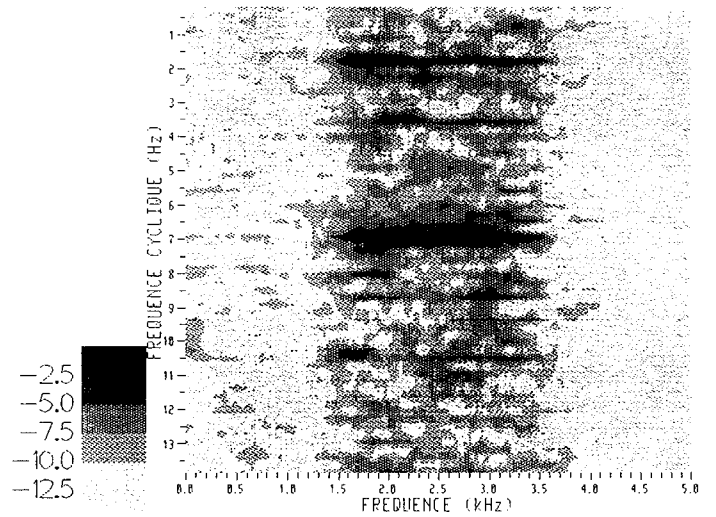


Figure 5

*CORRELATION SPECTRALE*

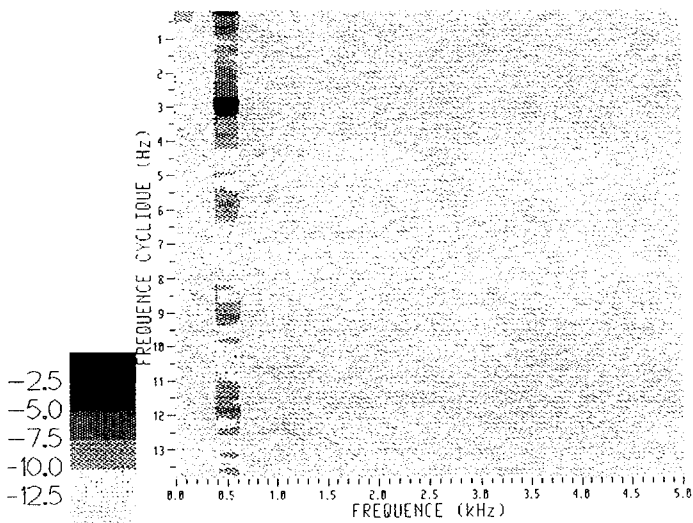


Figure 6

*CORRELATION SPECTRALE*

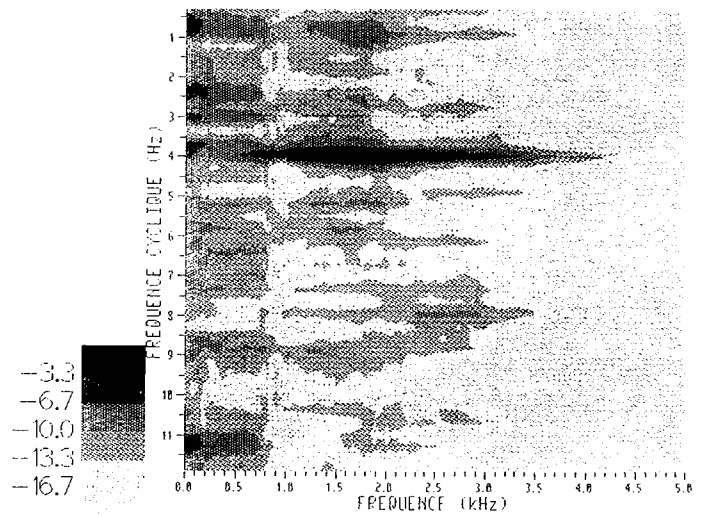


Figure 7