



MODELISATION DE CIBLES SONAR, FILTRAGE A Q-CONSTANT ET TRANSFORMATION EN ONDELETTES

F. MAGAND, P. FLANDRIN, M. ZAKHARIA

I.C.P.I. LYON, LABORATOIRE DE TRAITEMENT DU SIGNAL, UA 346 CNRS
25, RUE DU PLAT, 69288 LYON CEDEX 02, FRANCE

RESUME

La modélisation d'une cible sonar par un filtre transversal généralisé (ensemble de points brillants colorés) permet de décrire la plupart des phénomènes acoustiques mis en jeu dans les mécanismes de formation d'échos.

Dans une situation sonar, ce modèle est associé à une architecture de récepteur basée sur le filtrage adapté. Son identification conduit à une batterie de filtres adaptés aux diverses composantes de l'écho (copies intégrées ou dérivées du signal émis).

Du fait de la présence de termes d'intégrales et de dérivées dans le modèle, la faisabilité du traitement nécessite des conditions sur les réponses des divers filtres. La condition de produit bande-durée constant (pour la réponse de tous les filtres) conduit au choix du signal à émettre et à une architecture de réception du type filtrage à surtension constante.

On peut alors montrer que l'émission d'un tel signal et le traitement de l'écho par une batterie de filtres adaptés à une copie dérivée ou intégrée du signal émis sont équivalents (à rapport signal sur bruit élevé) à l'émission d'une impulsion et au traitement de l'écho par une batterie de filtres dont la réponse est une copie dérivée ou intégrée de la fonction d'autocorrélation du signal émis.

Du fait des propriétés du signal pré-défini (compression temporelle = dérivation, dilatation temporelle = intégration), on montre alors que l'analyse proposée est très similaire à l'analyse en ondelettes.

SUMMARY

Modelling a sonar target by a generalized transversal filter (set of coloured bright spots) can help in describing most of the acoustical phenomena involved in echo formation mechanisms.

In a sonar situation, this model is associated to a receiver architecture based on matched filtering. Its identification leads to a set of filters matched to the echo components (integrated and differentiated replica of the emitted signal).

Due to the presence of differentiation and integration terms in the model, one needs to impose conditions on the filters responses, to make the processing feasible. The constant time-bandwidth product condition (for all the filters responses) leads to the choice of the emitted signal and to a receiver architecture based on constant-Q filtering.

We can show (for high signal to noise ratio) that the described processing can also be done using an impulse as emitted signal: instead of emitting a special signal and analyzing the echo via a set of filters matched to derivatives or integrals of this signal, one can emit an impulse and analyze the impulse response through a set of filters whose responses are integrals or derivatives of the signal autocorrelation function.

Due to the properties of the pre-defined signal, (time compression = time derivative, time dilatation = time integration), we show that the proposed processing is very similar to a wavelet transform.

1. INTRODUCTION

La résolution du problème inverse en sonar (reconnaissance de cible à partir de ses échos) passe par une analyse détaillée du problème direct. Pour une situation sonar donnée, la formation d'échos sur une cible peut être considérée comme un filtrage linéaire (temporel) du signal émis [1].

Un tel filtre peut être complètement caractérisé par sa réponse impulsionnelle. Une telle caractérisation, quoique complète, souffre de manque de clarté dans la mesure où elle peut mélanger, dans le domaine temporel

divers phénomènes acoustiques se passant à des fréquences différentes. Il en est de même pour une représentation fréquentielle qui mélange, dans le domaine fréquentiel, des phénomènes acoustiques possédant différentes vitesses de propagation (phénomènes de dispersion).

L'intérêt des méthodes temps-fréquence a été clairement montré sur divers exemples [2], [3], [4]: ces méthodes permettent de séparer dans le plan temps-fréquence des phénomènes que l'on ne peut séparer ni dans le domaine temporel (par pondération), ni dans le domaine fréquentiel (par filtrage).



L'approche temps-fréquence du problème peut être de deux natures : approche "aveugle" et approche avec informations *a priori* (ou modèle). L'approche aveugle conduit à l'utilisation de la représentation de Wigner-Ville [2], [3], [4], [5].

L'utilisation de modèles classiques de signaux (modèle autorégressif, par exemple) permet, dans certains cas, d'établir une classification des cibles basée sur une classification de paramètres du modèle [6]. Il est cependant difficile d'établir des liens explicites entre les paramètres du modèle et les caractéristiques intrinsèques de la cible.

L'utilisation de modèles davantage liés aux propriétés acoustiques de la cible permet de surmonter cette difficulté. Il semble cependant que cette approche ait été peu développée pour l'instant, quand on la compare aux méthodes classiques. C'est dans cette perspective que nous nous placerons.

MODELE DE FILTRE TRANSVERSAL GENERALISE

La modélisation d'une cible par un filtre transversal généralisé [7], [8], [9] permet de décrire la plupart des phénomènes physiques mis en jeu lors de la formation d'un écho : écho optique, ondes de surface, convergence de rayons, divergence de rayons, diffraction,...

Ce modèle consiste à remplacer la cible par un ensemble de "points brillants colorés" renvoyant, en plus d'une copie pondérée du signal émis, une copie pondérée de ses différentes intégrales et dérivées. Pour un tel modèle, l'écho reçu peut s'écrire :

$$E(t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S(t) * [f_{nm} \delta^{(n)}(t - \tau_m)]$$

où * dénote la convolution, $\delta^{(n)}$ la n -ième dérivée ou intégrale de la distribution de Dirac. $S(t)$ est le signal émis et les coefficients f_{nm} et τ_m sont des paramètres caractéristiques de la cible. [7], [8], [9].

Un tel modèle est très proche de modèles acoustiques de cibles [11].

ARCHITECTURE DE RECEPTEUR A FILTRES ADAPTES

Dans un environnement bruité, le récepteur associé au modèle consisterait en une batterie de filtres adaptés aux diverses composantes de l'écho [7]. On pourrait alors, en sortie de chaque filtre, estimer la date d'arrivée de chaque composante et sa pondération en vue d'une classification des cibles en fonction de leurs paramètres [7], [8], [9].

Du fait de la présence de termes de dérivations et d'intégrations (d'ordre supérieur), on est amené à imposer des contraintes sur le signal à émettre. La contrainte choisie [7] est que toutes les réponses impulsionnelles aient le même produit durée-bande.

Cette contrainte, destinée à réduire la complexité du récepteur, conduit à l'expression fréquentielle du signal analytique associé au signal à émettre :

$$z(v) = A \exp[-\ln^2(v/v_0) / \ln g] \cdot \exp[2\pi i b \ln(v/v_0) / \ln g] \cdot u(v)$$

où v_0 est la fréquence centrale, g est un paramètre relié à la bande et b un paramètre relié à la durée [8].

Sous des conditions de phase stationnaire [7],[10] on peut montrer que le signal à émettre peut s'écrire, dans sa représentation temporelle réelle :

$$S(t) = A \exp[-\ln^2(t/t_0) / \ln g] \cdot \cos[2\pi b \ln(t/t_0) / \ln g] \cdot U(t)$$

où t_0 définit la date centrale (où l'enveloppe est maximale).

ANALYSE A Q-CONSTANT

Une propriété intéressante de ce signal, parmi de nombreuses, est qu'une compression (resp. dilatation) temporelle est équivalente (proportionnelle) à une dérivation (resp. intégration) temporelle [7].

Ceci confère au récepteur une structure de filtrage (adapté) à surtension constante (ou Q-constant) tel que décrit dans la figure 1a.

Dans la situation sonar, l'émission du signal peut être considérée comme le passage d'une impulsion (top d'émission) à travers un filtre linéaire dont la réponse est le signal à émettre. La formation d'écho sur une cible peut aussi être représenté par un filtre linéaire.

Du fait de la commutativité des filtres linéaires (figure 1b) et de leur associativité le récepteur de la figure 1a sera équivalent à celui de la figure 1c (à rapport signal sur bruit élevé) : au lieu d'émettre un signal particulier et de traiter les échos par des filtres adaptés à des copies intégrées et dérivées de ce signal, on peut, d'une façon équivalente, émettre une impulsion et analyser l'écho à travers une batterie de filtres dont les réponses sont des copies dérivées ou intégrées de la fonction de corrélation du signal [12], [13].

LIEN AVEC L'ANALYSE EN ONDELETTES

Les équivalences citées compression-dérivation, dilatation-intégration, se retrouvent au niveau des fonctions de corrélation du signal indiqué. La réponse du filtre de rang n s'écrit alors :

$$\gamma^{(m)}(t) = j^m \cdot g^{(m/2)(1+2n+m/2)} \cdot \gamma(g^{m/2} t)$$

avec: $\omega_0 = 2\pi v_0 = g^n$

Le récepteur se ramène alors à une batterie de filtres dont les réponses sont des versions comprimées ou dilatées de la fonction d'autocorrélation du signal choisi. Ce dernier sera choisi de façon à s'ajuster au mieux à la bande des transducteurs utilisés.

La structure de récepteur s'apparente alors à l'analyse en ondelettes [14], [15], surtout utilisée dans l'analyse de signaux musicaux ou audio [16]. Partant de la définition de la transformée en ondelette d'un signal x par une ondelette analysante h :

$$\Gamma_{x,w}(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) w\left[\frac{t-\tau}{a}\right] dt$$

on peut montrer [12] que la batterie de filtres effectuée une analyse en ondelettes de la réponse de la cible, l'ondelette analysante n'est rien d'autre que la fonction d'autocorrélation du signal. Il est important de noter qu'elle est de la forme "naturelle" proposée dans [14]. Ce signal satisfait aux conditions d'admissibilité décrites en [14-16]:

$$c_h = \sqrt{\pi \ln g} < \infty; |H_{n,g,c}(0)|^2 = 0.$$

Le paramètre d'échelle est, dans notre cas: $a = g^{-m/2}$.

Ce paramètre est généralement voisin de 1, contrairement à l'approche classique en ondelettes (grille dyadique, analyse par octave), mais il correspond à des taux de compression conduisant à une dérivation ou à une intégration.

EXEMPLES

Les exemples décrits correspondent aux paramètres de signal suivants:

-limites en fréquence (à -20 dB) $250 \text{ kHz} < \nu < 850 \text{ kHz}$

-fréquence centrale: $\nu_0 = 461 \text{ kHz}$ et $g = 1,084698$

Pour toutes les images présentées:

-l'échelle des temps (horizontale) est de $25,6 \mu\text{s}/\text{div}$

-l'échelle verticale est donnée en ordre de dérivée ou d'intégration $-15 < n < +15$

-la dynamique de visualisation est de 48 db (6 dB/niveau de gris)

La figure 2 montre l'analyse d'une impulsion. On met alors en évidence un "noyau reproduisant" qui sera l'élément générateur de toute autre événement impulsif.

La figure 4 montre l'analyse d'un signal constitué de deux "paquets d'onde" gaussiens (figure 3) décalés en fréquence (250 kHz et 500 kHz) et en temps (60 μs). Elle montre la possibilité d'interprétation d'une telle analyse en termes de représentation temps-fréquence.

Les figures 5 et 6 montrent un exemple d'analyse d'échos sonar [5], [13]. Il s'agit d'une coque sphérique contenant une aspérité hémisphérique. L'écho de la figure 5 est obtenu en incidence normale sur la bosse. l'écho de la figure 6 est obtenu à 45° de cette normale. On remarque que la composante notée 1 de l'écho se rapproche de l'écho spéculaire (noté 0) quand on se rapproche de la normale, alors que la composante 2 reste quasiment identique. Ceci provient du fait que l'origine physique des deux échos est différente: la composante 1 proviendrait de la réflexion spéculaire sur l'aspérité (réflexion confondue avec celle de la sphère) alors que la composante 2 serait due à des ondes de surface (peu perturbées par l'aspérité, pouvant donc être utilisées pour des classifications de formes).

CONCLUSION

Les exemples décrits montrent l'intérêt d'une analyse à Q-constant basée sur un modèle de cible. L'interprétation des images obtenues en termes d'ondes permet de mettre en évidence certaines propriétés intrinsèques de la cible considérée.

L'extraction automatique des paramètres du modèle pourra décrire ces cibles par une quantité d'informations plus réduite. Elle se heurte cependant à des problèmes de calcul numérique [5], [13].

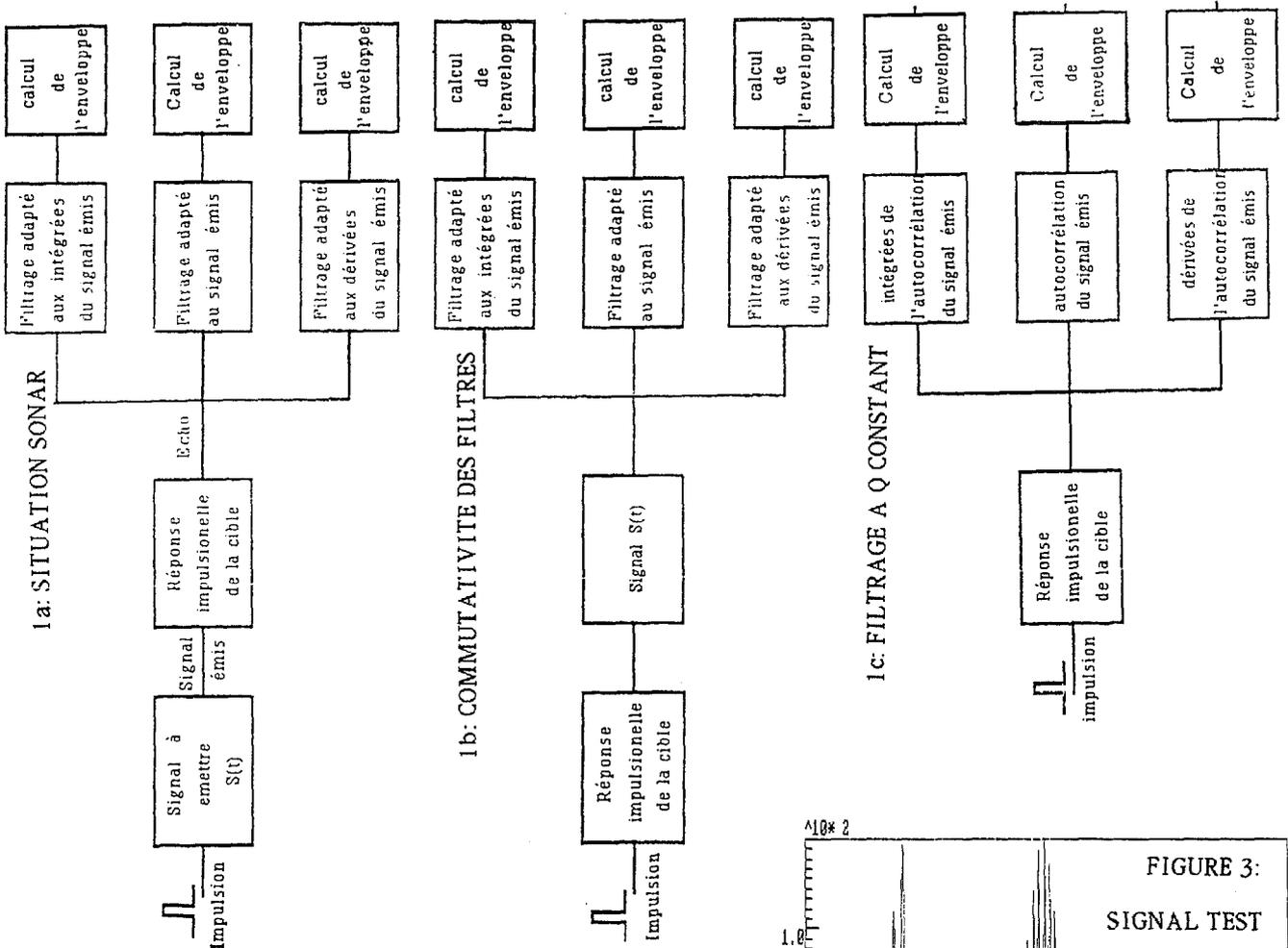
La similitude de l'analyse proposée avec l'analyse en ondelettes classique permet, en utilisant des ondelettes bien particulières (mais pertinentes) de posséder une interprétation physique du résultat d'analyse. Cette similitude permet également de profiter de l'arsenal mathématique développé par la "communauté ondelettes", surtout en ce qui concerne l'inversion et la synthèse.

REMERCIEMENTS

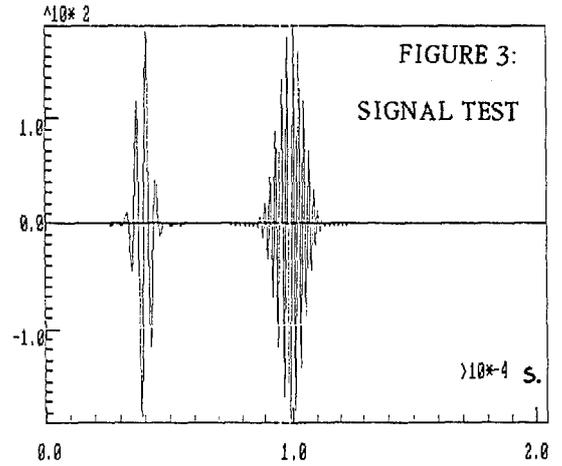
Les mesures acoustiques ont été réalisés au CNRS LMA labo U.S.

REFERENCES

- [1] M. ZAKHARIA : "Problèmes inverses en sonar de pêche : possibilités et limitations." Revue du CETHEDEC, 20e année, 3e trimestre 1983, N° 76 pp.79-90.
- [2] P. FLANDRIN, J. SAGELOLI, J.P. SESSAREGO, M. ZAKHARIA : "Application of Time-Frequency Analysis to the Characterization of Surface Waves on Elastic Targets". Acoust. Lett., 10(2), pp.23-28, 1986.
- [3] P. FLANDRIN, J. SAGELOLI, J.P. SESSAREGO, M. ZAKHARIA : "Application de l'Analyse Temps-Fréquence à la Caractérisation de Cibles". Onzième Colloq. GRETSI, (Nice), Juin 1987, pp. 329-332.
- [4] M. ZAKHARIA, P. FLANDRIN, J. SAGELOLI, J.P. SESSAREGO : "Analyse temps fréquence appliquée à la caractérisation acoustique de cibles". J. Acoustique 1 (1988) pp.185-188.
- [5] M. ZAKHARIA, P. FLANDRIN, F. MAGAND : "Time-frequency and constant-Q analysis of target echoes." 13th International Conference on Acoustics, Dubrovnick symposium on sea acoustics, Yougoslavie 89, à paraître.
- [6] P. DEGOUL, P. FLANDRIN, N. GACHE, M. ZAKHARIA : "Fish echoes classification via auto-regressive modeling." Progress in Fisheries Acoustics, IOA Conference, Lowestoft, March 89, à paraître.
- [7] R.A. ALTES : "Sonar for a generalized target description and its similarity to animal echolocation systems". J.Acoust.Soc.Am. 59, 97-105 1976.
- [8] M. ZAKHARIA : "Contribution à la caractérisation et à l'identification de formes simples par sonar actif: application à un sonar de pêche." Thèse de Docteur-Ingénieur, spécialité: acoustique, Faculté des sciences de Luminy, Université d'Aix-Marseille II.1982
- [9] M. ZAKHARIA, J.P. SESSAREGO : "Sonar target classification using a coherent echo processing."IEEE, ICASSP-82, pp.331-334, Paris.1982
- [10] M. ZAKHARIA : "Relationship between Paley-Wiener theorem and the stationary phase method?"IEEE, ICASSP-84, pp. 31.10.1-31.10.4, San Diego, USA., 1984.
- [11] A. FREDMAN : "A mechanism of echo formation". Acustica,12, 61-70 1962.
- [12] P. FLANDRIN, F. MAGAND, M. ZAKHARIA : "Generalized target description and wavelet decomposition". Rapport Interne ICPI TS 8809
- [13] F. MAGAND : "Contribution à l'étude des échos de sphères rugueuses, analyse temps-fréquence et analyse à Q-constant". Rapport de stage de D.E.A. d'acoustique INSA Lyon, Sept 88.
- [14] A. GROSSMANN, J. MORLET : "Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape." SIAM J. Math. Anal. vol 15, n°4, pp. 723-736, 1984.
- [15] R. KRONLAND-MARTINET, J. MORLET, A. GROSSMANN: "Analysis of sound patterns through wavelet transform." Int. J. Pattern Recogn. Artif. Intell., vol. 1, n° 2, pp? 273-302, 1987.
- [16] A. GROSSMANN, R. KRONLAND-MARTINET: "Time and scale representation obtained through continuous wavelet transform". Signal processing IV theories and applications, North Holland, 1988, Vol 2, pp. 475-482.



FIGURES 1: ANALYSE A Q CONSTANT



6 dB/niveau de gris

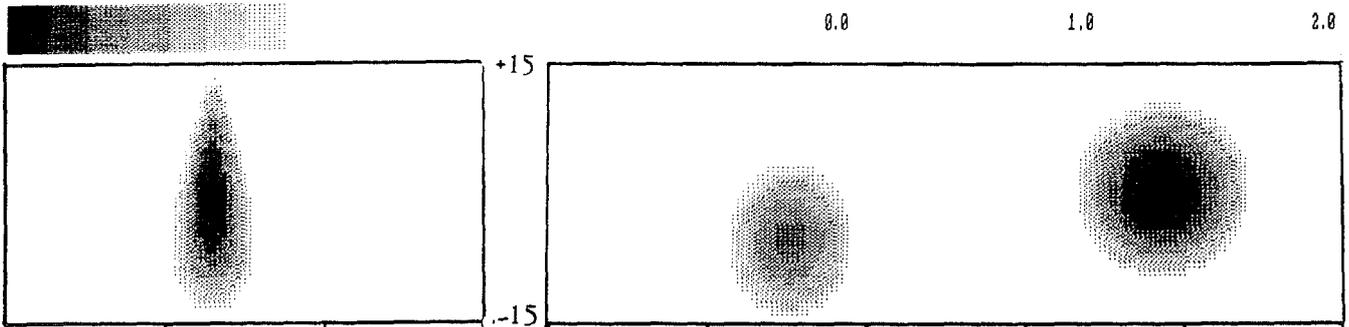


FIGURE 2: NOYAU REPRODUISANT

FIGURE 4: ANALYSE DU SIGNAL TEST

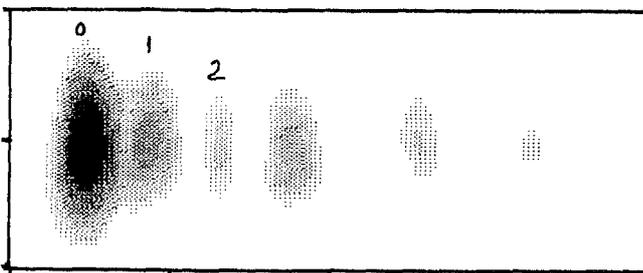


FIGURE 5: ECHO D'UNE COQUE SPHERIQUE (ASPERITE à 45°)

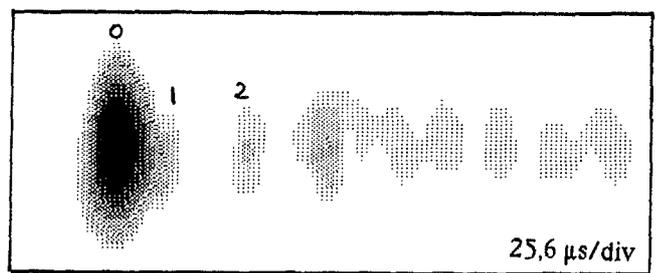


FIGURE 6: ECHO D'UNE COQUE SPHERIQUE (ASPERITE A 0°)