



CLASSIFICATION DE SIGNAUX RADAR PAR ONDELETTES ET RESEAUX DE NEURONES

Daniel MULLER (*)
Ronan LE LETTY (**)

(*) THOMSON-CSF, division SDC
18 Avenue du Maréchal Juin, 92363 Meudon-La-Forêt Cedex, FRANCE
(**) ISEN
41 Boulevard Vauban, 59046 LILLE Cedex, FRANCE

Résumé. La présente communication concerne la mise en œuvre, sur une base de signaux radar enregistrés, d'un traitement d'analyse temps-fréquence par décomposition en ondelettes. Deux familles d'ondelettes sont considérées ; la forme des fonctions mères associées est déduite de modèles simplifiés des signaux analysés, et le traitement étudié est mis en relation avec le principe du filtrage adapté. Les résultats du filtrage en ondelettes sont exploités dans un dispositif de classification, à l'aide du réseau de neurones HOPI, en vue d'une reconnaissance automatique du type d'hélicoptère. Des résultats expérimentaux sont obtenus par simulation.

Abstract. This paper deals with the application of a time-frequency analysis, performed via a wavelet transformation on a data base of recorded radar signals. Two families of wavelets are considered : the original functions are deduced from a simplified model of the incoming signals, and their relation with the matched filter is presented. The results of the wavelets transformation are processed by a detection-classification scheme, using the neural network HOPI. Experimental results obtained by simulation are presented in the perspective of automatic recognition of the type of an helicopter by a radar sensor.

1. INTRODUCTION

La présente communication concerne une évaluation de l'apport des techniques d'analyse par ondelettes, à la caractérisation et à la classification d'échos radar d'hélicoptères.

La famille des outils d'analyse temps-fréquence s'avère particulièrement adaptée à la caractérisation d'échos radar d'hélicoptères, dont la contribution principale est constituée des "flashes de pales", résultant de la réflexion de l'onde radar sur les pales de l'hélicoptère à l'instant où celles-ci sont perpendiculaires à l'axe de propagation.

L'objectif des travaux présentés était de cerner l'apport de l'approche de traitement par ondelettes, vis-à-vis d'approches plus classiques comme la Transformée de Fourier glissante. Dans le but de quantifier cet apport autrement que par des critères "visuels", les résultats du traitement par ondelettes ont été exploités par un dispositif de classification, dans le but de déterminer l'aptitude des traitements analysés à produire des caractéristiques "signantes", exploitables à des fins de reconnaissance du type d'hélicoptère.

Dans une première partie, est décrit succinctement le phénomène physique définissant les caractéristiques des signaux étudiés. Deux modèles simplifiés sont présentés. Tous deux conduisent à une expression analytique de la réponse temporelle, dont la forme coïncide avec le modèle général des ondelettes à support compact. Après un bref rappel du lien de ces dernières avec les techniques d'analyse temps-fréquence, nous présentons les résultats obtenus par application, sur une séquence de signaux réels, de filtrage par les bases d'ondelettes issues des deux modèles évoqués ; à titre comparatif est appliqué également un filtrage par Transformée de Fourier Discrète glissante.

Dans une deuxième partie est décrite une technique d'extraction des paramètres à partir des résultats de la transformée en ondelettes ; les paramètres extraits sont dans une dernière étape, présentés à l'entrée d'un dispositif de classification par

réseaux de neurones. Quelques résultats obtenus à partir du traitement des signaux réels mentionnés sont fournis à titre illustratif.

2. MODELISATION DES SIGNAUX ETUDIÉS

Le système considéré est constitué d'un radar Doppler à impulsions, (disposant d'une cohérence de phase d'impulsion à impulsion), et d'un hélicoptère en vol stationnaire, éclairé par le faisceau de l'antenne radar. Trois contributions principales interviennent dans la constitution du signal composite réfléchi par les différentes parties de l'hélicoptère :

- un "écho de cellule", lié à la réflexion de l'onde radar par le cockpit de l'hélicoptère. Cette contribution est affectée d'un spectre Doppler monoraie, dont la fréquence est donnée par la vitesse radiale de la cellule par rapport au radar. Cette contribution, dans le cas d'un hélicoptère stationnaire, se trouve généralement noyée dans les échos renvoyés par le sol et les obstacles fixes situés dans l'environnement du radar.

- une contribution due au rotor principal, à spectre Doppler étendu, mais généralement de niveau faible.

- un "écho de pale" dont l'amplitude est significative lorsque l'axe de l'une des pales de l'hélicoptère se trouve perpendiculaire à la direction de propagation des ondes radar. Nous nous intéresserons par la suite à cette contribution uniquement.

Les caractéristiques de l'écho de pale sont conditionnées par les grandeurs suivantes :

- Fréquence de rotation du rotor : $F_{rot} = 1/T_{rot}$
- Nombre de pales : N
- Longueur d'onde : λ
- Fréquence de récurrence du radar : $F_r = 1/T_r$
- Longueur d'une pale : L

L'écho rétrodiffusé par l'hélicoptère se présente comme un train de signaux quasi impulsions. L'intervalle de temps séparant deux "flashes" est donné par : $T_{fl} = T_{rot} / 2N$ si le nombre de pales est impair, et par : $T_{fl} = T_{rot} / N$ s'il est pair.



Deux modèles sont envisagés pour la description d'un "flash" élémentaire :

• Modèle de l'antenne tournante :

La pale élémentaire peut être considérée comme une antenne directive en rotation à la vitesse angulaire du rotor. Le diagramme de cette "antenne équivalente" est approché par un diagramme gaussien d'ouverture à 3 dB :

$$\theta_3 = 1.2 \frac{\lambda}{L}$$

et son défilement sur le radar induit une modulation de l'amplitude du signal reçu de la forme :

$$G(t) = \exp(-t^2/2\sigma^2),$$

avec :

$$\sigma = \frac{\theta_3 \cdot \tau_{rot}}{4\pi \sqrt{L \cos 2}}$$

La phase du signal au cours de l'impulsion est définie par la vitesse radiale moyenne du centre de phase de l'antenne équivalente.

Dans ces conditions le signal temporel reçu au cours d'une impulsion peut-être modélisé par :

$$s_1(t) = s_0 \cdot \exp(j2\pi f_d t) \cdot \exp(-t^2/2\sigma^2)$$

avec :

$$f_d = 2\pi F_{rot} \cdot L / \lambda$$

• Modèle du barreau rectiligne : [1]

On considère dans ce cas le signal rétrodiffusé comme la superposition des contributions issues de chaque point de la pale en rotation. Leur intégration sur la longueur de la pale conduit, après calculs à la forme suivante :

$$s_2(t) = s_0 \exp(ju(t)) \frac{\sin u(t)}{u(t)}$$

avec :

$$u(t) = 2\pi f_d \cdot t \cos\left(\frac{\lambda}{L} f_d t\right)$$

L'amplitude du signal est modulée en $\sin u/u$, et sa fréquence porteuse est modulée par un terme qui représente la variation de vitesse Doppler moyenne pendant la durée d'impulsion.

3. ANALYSE TEMPS FREQUENCE PAR DECOMPOSITION EN ONDELETTES

3.1 Principes [2], [3], [4]

L'observation des expressions obtenues dans les deux modèles présentés, permet de constater qu'elles satisfont l'une et l'autre à une forme plus générale :

$$S_f(t) = \exp(j \varphi(f,t)) \cdot A(f,t),$$

dans laquelle les fonctions $\varphi(f,t)$ et $A(f,t)$ dépendent du modèle retenu, et le paramètre f dépend des caractéristiques de l'hélicoptère analysé.

Cette modélisation permet de définir un processus de traitement applicable au signal reçu par un radar à impulsion en présence d'un hélicoptère en vol stationnaire. Le traitement optimal de détection consiste à appliquer aux signaux reçus le filtre adapté au signal attendu, soit, dans notre cas, un banc de filtres de la forme :

$$h_i(t) = \exp[-j \varphi(f_i,t)] \cdot A(f_i,t),$$

adaptés aux différentes valeurs possibles du paramètre f_i .

L'application d'un banc de filtres glissants sur le signal temporel monodimensionnel d'origine peut en fin de compte être considérée comme une analyse temps-fréquence de ce signal.

L'examen précis des deux modèles proposés met en évidence une propriété commune des filtres adaptés associés, à savoir leur "bande passante" à Q constant. La réponse impulsionnelle des filtres peut en effet se mettre sous la forme suivante :

$$h_{1f}(t) = \exp(j2\pi ft) \exp\left(-\left(\frac{\pi ft}{Q}\right)^2\right)$$

en posant : $Q_1 = 1.2 / \sqrt{2 \text{Log } 2}$

et :

$$h_{2f}(t) = \exp(j2\pi ft) \frac{\sin\left(\frac{\pi ft}{Q_2}\right)}{\left(\frac{\pi ft}{Q_2}\right)}$$

avec : $Q_2 = 1/2$

Les filtres $h_{1f}(t)$ et $h_{2f}(t)$ peuvent être considérés comme des filtres passe-bande, centrés sur la fréquence f , et de bande passante $B = f/Q$.

On note enfin que l'application du banc des filtres $h_{1f}(t)$ et $h_{2f}(t)$ peut être également considérée comme la décomposition en ondelettes des signaux d'origine, sur une base dont les fonctions mères sont respectivement :

- l'ondelette de Morlet classique $H_1(x) = e^{j\mu x} e^{-x^2}$

- une ondelette en "sinus cardinal" $H_2(x) = e^{j\mu x} \sin x / x$

Ainsi, le traitement proposé peut être considéré simultanément sous l'angle du filtrage adapté, de l'analyse temps-fréquence, du filtrage passe-bande à Q constant, et de la décomposition en ondelettes.

3.2 Mise en œuvre sur signaux réels

L'application du filtrage décrit ci-dessus selon les deux modèles mentionnés, a été mise en œuvre par simulation sur une base de signaux enregistrés. Les signaux ont été acquis sur différents types d'hélicoptères, dans le cadre d'essais effectués sur un radar de veille.

L'implantation du traitement nécessite le choix de paramètres supplémentaires tels que :

- la durée de description des filtres en ondelettes (longueur de réponse impulsionnelle), dépendant de leur fréquence centrale de par leur forme à Q constant,

- le domaine de calcul en fréquence, limité par la fréquence d'échantillonnage du signal et balayé selon une échelle logarithmique.

Une mise en œuvre systématique avec détection automatique nécessite des précautions particulières dans le traitement des "effets de bord", susceptibles d'engendrer des détections parasites.

A titre de comparaison, la base de données disponible a été également traitée par Transformée de Fourier Discrète glissante.

Enfin, dans le but de pouvoir comparer entre eux les résultats de divers traitements en termes de détection, une normalisation par rapport au bruit de fond (bruit thermique des récepteurs), est indispensable. Elle est obtenue en assurant un gain unitaire sur bruit blanc à tous les traitements appliqués.

Des simulations ont permis de mettre en évidence l'influence des divers paramètres sur la forme du résultat.

Concernant la DFT glissante, est constatée son inaptitude à localiser précisément l'instant d'apparition des signaux impulsionnels, et à mesurer leur étendue spectrale. Le choix de filtres "longs" (par exemple 50 à 100 échantillons) permet une localisation "fréquentielle" fine, au prix d'un "trainage" sur l'axe temporel. Un filtre court (par exemple 5 à 10 échantillons) localise correctement les signaux impulsionnels, au détriment de la qualité de leur analyse spectrale.

L'analyse par ondelettes à Q constant permet de s'orienter vers un compromis. Le choix de filtres à Q élevé, donc très sélectifs, privilégie l'analyse spectrale des signaux ; le choix de Q faibles conduit à une optimisation de la localisation temporelle de signaux impulsionnels.

3.3 Résultats

Au terme d'une analyse préliminaire ayant conduit à l'optimisation du réglage des paramètres de définition, l'ondelette de Morlet (modèle Gaussien) a été retenue comme fournissant l'image temps-fréquence de contraste maximal.

La sensibilité au facteur de résonance Q est apparue, sur la base étudiée, comme faible.

La figure 1 présente un exemple de signal d'origine, sur lequel les phénomènes impulsionnels d'intérêt apparaissent superposés à un bruit basse fréquence engendré par les échos de sol environnant l'hélicoptère.

Les figures 2 à 4 présentent les résultats de l'analyse temps-fréquence appliquée sur le signal précédent par l'ondelette de Morlet, par l'ondelette en sinus cardinal, et par la TFD glissante respectivement.

On note l'apparition de phénomènes quasi-impulsionnels dans le temps, et d'extension spectrale large répartie ici dans tout le spectre analysé $[-F_c/2, F_c/2]$. Cette réponse est caractéristique d'un hélicoptère à nombre pair de pales ; deux pales de vitesses radiales opposées se trouvent dans ce cas simultanément en position de réflectivité, et le spectre total est occupé par le signal rétrodiffusé. Dans le cas d'hélicoptères à nombre impair de pales, deux contributions de vitesses opposées ne sont pas vues simultanément, mais séquentiellement.

4. DETECTION ET CLASSIFICATION D'ECHOS

4.1 Principes

L'objectif final des traitements étudiés étant de classer les réponses en vue d'une identification du type d'hélicoptère, une chaîne de post-traitement et de classification a été mise en place.

La première étape consiste à détecter la présence des "flashes" sur une image temps-fréquence ; (le signal dû au rotor principal se trouve également porteur d'information, mais son faible niveau par rapport au bruit, a conduit à ne pas l'exploiter dans le cadre de cette étude).

Les composantes connexes décrivant un flash élémentaire sont détectées sur un critère de rapport signal à bruit énergétique. Une référence de bruit E_b est d'abord estimée par moyenne logarithmique sur toute l'image. Pour chaque instant d'échantillonnage t_i , est ensuite estimée l'énergie intégrée sur le domaine des fréquences positives E_i^+ (resp. négatives, E_i^-). Lorsque le rapport signal à bruit E_i^+/E_b (resp E_i^-/E_b) dépasse un seuil S_1 (à taux de fausse alarme constant), la composante connexe des pixels $X(\alpha, \beta)$ centrée sur l'instant t_i , et d'amplitude supérieure à un seuil S_2 , est sélectionnée.

Chacune des composantes connexes conservées est dans une deuxième étape représentée par un "vecteur d'attributs" morphologiques. Certains des attributs calculés sont liés à la position relative de la composante analysée dans l'image ; d'autres, dits "intrinsèques", caractérisent la forme de "l'imagette" dans le plan temps-fréquence (extension temporelle et fréquentielle, facteur de forme, moments d'inertie, ...). Un nombre de 11 attributs est en pratique calculé sur chaque flash élémentaire.

Dans une dernière étape, les populations constituées par la base des vecteurs d'attributs sont traitées par un dispositif de classification à apprentissage supervisé.

Le classifieur retenu est le réseau de neurones HOPI (Higher Order Polynomial Input) [5], [6]. Ce réseau, exploité ici avec une couche cachée, consiste dans la recherche d'une fonction polynomiale de degré 2 multivariable, dont les coefficients sont ajustés, au cours de la phase d'apprentissage de façon à assurer la séparation maximale des sorties sur la base des données de test. à chaque étape (couche cachée, couche de sortie), la combinaison assurant la meilleure séparation en terme d'erreur quadratique résiduelle vis à vis d'une fonction objectif est retenue. Cette méthode d'apprentissage permet de mettre en évidence le caractère discriminant des attributs les uns par rapport aux autres. Les coefficients déterminés sont ensuite figés, et le réseau configuré est appliqué sur la base de généralisation.

Le choix de ce classifieur a été dicté par des raisons de simplicité de mise en œuvre, et d'adéquation avec la forme du problème posé (possibilité d'apprentissage supervisé, nombre faible d'attributs d'entrée, ...).

4.2 Résultats

La chaîne de traitement et de classification a été évaluée sur une base de données contenant des appareils de 6 types distincts. Chaque catégorie est représentée par une population de quelques dizaines d'individus en moyenne. Les attributs utilisés ont été calculés sur les images temps-fréquence de transformée par ondelettes de Morlet. Les taux de reconnaissance ont été évalués expérimentalement par partitionnement aléatoire de la base disponible entre apprentissage et généralisation.

Les valeurs présentées ci-après sont mesurées dans la phase de généralisation.

Le tableau ci-dessous récapitule les performances obtenues sur différentes configurations du réseau (0 ou 1 couche cachée, nombre variable d'attributs pris en compte ...) et de la base de données (2 ou 3 classes présentées simultanément au réseau).

N° expérience	Nombre d'échantillons (généralisation)	Taux de reconnaissance	Taux de non reconnaissance
1	21	95,2 %	4,8 %
2	21	71,4 %	28,6 %
3	25	92,0 %	8,0 %
4	12	83,3 %	16,7 %
5	9	66,7 %	33,3 %
6	12	83,3 %	16,7 %
7	14	50,0 %	50,0 %

Il ressort de l'analyse effectuée le caractère nettement discriminant des attributs "relatifs", dont la valeur est liée à la période d'apparition des flashes et à leur parité. Sur la base de données étudiée, les attributs "intrinsèques" apparaissent comme relativement pauvres en quantité d'information, du fait du petit nombre d'échantillons temporels décrivant un flash élémentaire. Néanmoins un taux de bonne reconnaissance moyen supérieur à 75 % est atteint.

5. CONCLUSIONS

L'objectif des traitements étudiés était d'analyser l'apport de la transformée en ondelettes à la caractérisation de signaux d'hélicoptères.

Deux modèles d'ondelettes ont été considérés, tous deux pouvant être considérés comme appliquant le filtre adapté à un modèle du signal renvoyé par un hélicoptère en vol stationnaire. Le modèle d'ondelette à support gaussien a été mis en évidence comme donnant lieu à l'image temps-fréquence de contraste maximal. Le processus de détection et de classification mis au point en post-traitement de l'analyse par ondelettes a montré la



capacité de cette dernière a produire des caractéristiques "signantes" du type d'hélicoptère.

L'étude présentée ici reste limitée quant au volume des populations analysées mais fait ressortir l'intérêt de l'approche dans la perspective d'un traitement de reconnaissance automatique de cibles radar.

6. BIBLIOGRAPHIE

[1] D. ELIAS DE LOS REYES, J.C. ESCANES: "Utilisation de radars à impulsions pour la détection des hélicoptères - Contraintes de conception.", Int. Conf. Radar 89, pp. 529-534, vol. II

[2] A. GROSSMANN R. KRONLAND-MARTINET : "Time-and-Scale representations obtained through continuous wavelet transform.", Signal Processing IV vol.II, pp 475-482, North Holland Publ. 1988

[3] A. MAGUER, P.ALINAT, G.GOULLET : "Etude de bruits impulsifs par analyse par banc de filtres à Q constant.", XII° colloque GRETSI 1989, pp. 399-402, vol. I

[4] A. LEMER, J.M. NICOLAS, P. GIANCONE : : "Identification automatique de bruits impulsifs sous-marins.", XII° colloque GRETSI 1989, pp. 403-407, vol. I

[5] R.L. BARRON : "Learning networks improve computer-aided prediction and control.", Computer Design , pp. 65-70, 1975

[6] R.P. LIPPMANN : "Pattern classification using neural networks.", IEEE Communication Magazine, pp. 47-67, Nov. 1989

7. REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à M. Alain LEMER de THOMSON-SINTRA ASM avec lequel des discussions bénéfiques sont intervenues à plusieurs reprises au cours de l'étude.

Signal brut C-E2T1

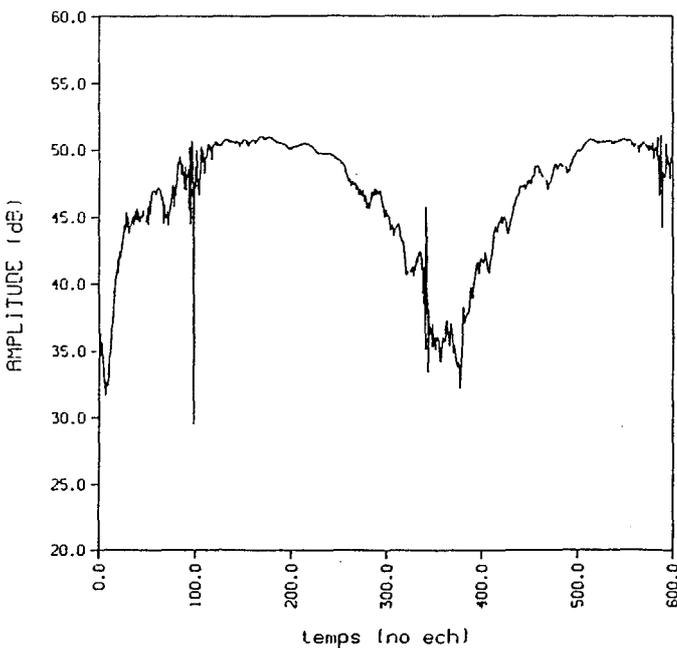


Figure 1

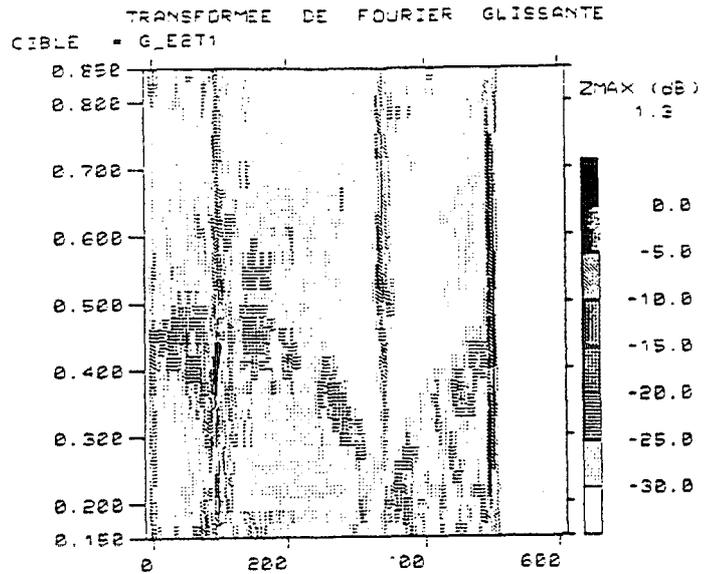


Figure 2

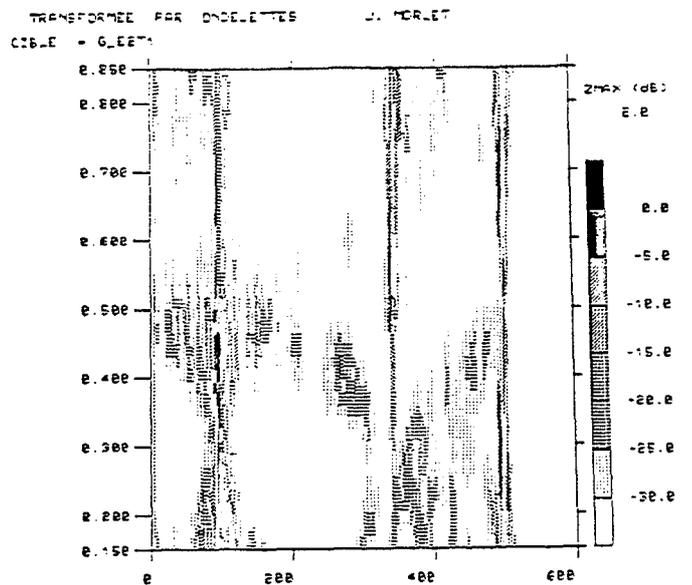


Figure 3

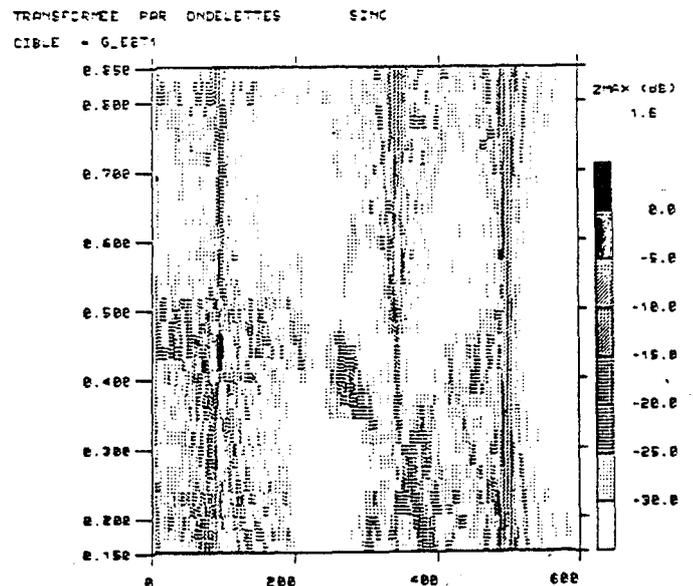


Figure 4