

# DIXIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

925



NICE du 20 au 24 MAI 1985

---

IMAGERIE SONAR DE CIBLES MOBILES

PAR D. MEDYNSKI, Ph. DOREY

SPATIALES

B.P. 72 - 92322 - CHATILLON CEDEX -

---

## RESUME

### RESUME

L'analyse spectrale d'un signal rétrodiffusé par une cible mobile peut conduire à la séparation, par effet de Doppler différentiel, des principaux points brillants répartis sur cette cible, et apporter ainsi une information de signature transversale. Toutefois, dans les applications sonar courantes, les conditions pratiques (longueur et vitesse de défilement de la cible, durée de l'impulsion) font que le nombre de points séparables par l'analyse classique de Fourier reste en général très réduit.

On examine les possibilités de dépasser cette limite par la mise en oeuvre des nouvelles techniques de l'analyse spectrale moderne, et on essaie d'en préciser les conditions d'application dans des cas typiques d'utilisation.

L'exposé est illustré par le résultat de diverses simulations comparatives.

## SUMMARY

### SUMMARY

Spectral analysis of a signal back scattered by a moving target may be useful to separate the different highlights by differential Doppler effect, and thus give a transverse signature.

However, in usual applications, practical configurations (length and speed of target, pulse duration) imply reduced performances when only Fourier analysis is performed.

The improvements expected with modern spectral analysis techniques are examined, from computer simulations.



## I - INTRODUCTION -

Dans les systèmes radar et sonar actuels, on accorde de plus en plus d'importance à la fonction de classification des cibles détectées.

Pour cela, on cherche à mettre en évidence une signature de l'objet en séparant les points brillants répartis à sa surface. Le plus souvent, ce résultat est obtenu par l'utilisation de signaux large bande, qui fournissent une image de la cible dans le sens longitudinal.

Nous examinons ici les conditions dans lesquelles les points brillants peuvent encore être séparés à partir de signaux à fréquence pure, dans le cas d'un sonar observant une cible étendue en mouvement.

Dans ce cas, les signaux en provenance des différents points brillants de la cible vont se trouver décalés à la fois en temps (retard de propagation), et en fréquence (Doppler différentiel). Ces décalages restent a priori inférieurs au pouvoir de résolution résultant d'un traitement de signal classique. Nous chercherons à dépasser cette limitation par la mise en oeuvre de nouvelles approches du traitement de signal, fondées sur la notion de modèle.

## II - MODELISATION AUTOREGRESSIVE ET IMAGERIE SONAR

De nombreuses méthodes modernes de traitement de signal, apparues dans des applications d'analyse spectrale - dite super-résolutive - ou de reconnaissance et de classification - sont basées sur cette notion de modélisation [1]. On sait qu'un des modèles les plus couramment utilisés est le modèle autorégressif, dans lequel on suppose que les échantillons  $x_n$  du signal obéissent à l'équation :

$$x_n = \sum_{i=1}^p a_i x_{n-i} + \varepsilon_n$$

$a_i$  paramètres du modèle  
 $\varepsilon_n$  erreur de prédiction

Cette approche peut concerner aussi bien des signaux stationnaires que des signaux non stationnaires. Dans le premier cas, elle conduit à une estimation de la densité spectrale de puissance du signal modélisé exprimée par :

$$\hat{S}(f) = \frac{\sigma^2}{|1 - \sum_{i=1}^p a_i \exp(2\pi j f i \Delta t)|^2}$$

Dans le second cas, l'erreur de prédiction  $\varepsilon_n$  peut être utilisée pour détecter les changements dans la structure du signal, et les situer de façon également très précise dans le temps.

Nous allons examiner tour à tour l'application possible de ces deux aspects en quelque sorte complémentaires de la modélisation autorégressive.

### II-1 - STATIONNARITE ET ANALYSE TRANSVERSALE -

On envisage une application sonar dans laquelle l'étalement spectral des échos rétrodiffusés par une cible à points brillants, et mobile reste assez faible.

Ainsi, pour une cible de 100m de long, insonifiée à 30kHz pendant 100ms, et se déplaçant à 5 noeuds, l'étalement Doppler observé en supposant une répartition uniforme des points brillants serait :

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} \frac{L}{d} \sin^2 \alpha = 10.000 \frac{\sin^2 \alpha}{d} \text{ (Hz)}$$

où  $d$  est la distance (en mètres) émetteur-cible

$\alpha$  est l'attitude de la cible

A 1000m, et par le travers ( $\alpha = 90^\circ$ ), l'étalement Doppler n'est que de 10Hz, ce qui correspond à la résolution classique de l'analyse de Fourier, compte tenu de la durée du signal émis.

On peut donc penser que l'analyse spectrale autorégressive, dont les propriétés de super résolution sont connues, peut permettre d'améliorer la possibi-

lité d'analyse des points brillants.

Pour illustrer cette proposition, simplifions le problème en considérant le cas d'une cible à deux points brillants situés à ses deux extrémités.

Le signal reçu sera composé de deux sinusoides, décalées en fréquence de  $\Delta f$ , et en temps de  $\frac{2L \cos \alpha}{c}$

retard qui peut être négligé tant que  $\alpha$  reste voisin de  $90^\circ$ .

Les figures 1a et 1b comparent dans cette situation le résultat d'une analyse spectrale classique, et celui d'une estimation du spectre par modélisation autorégressive (méthode L-S [2]). On a simulé un écho provenant d'une cible de 60 m de long, se déplaçant à 5 noeuds, et comportant deux points brillants situés à chaque extrémité.

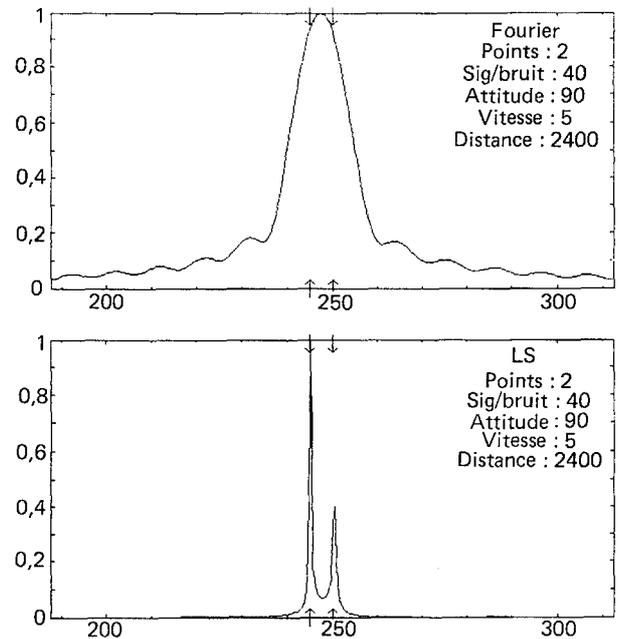


Fig. 1 - Analyse Doppler  $\alpha = 90^\circ$ .

La fréquence d'émission du sonar est de 30 kHz.

La distance émetteur-cible varie de façon telle que quelle que soit l'attitude, les deux sinusoides constituant le signal restent séparées de 5Hz. Le rapport signal à bruit est de 40dB.

Le signal émis a une durée de 100ms, ce qui correspond à une résolution spectrale de 10Hz pour l'analyse de Fourier.

Dans ces conditions, on constate que l'analyse de Fourier ne permet pas de séparer les deux points brillants, tandis que la modélisation A.R. les localise correctement.

Quelques différences surgissent à partir du moment où le terme de retard entre les deux points brillants ne peut plus être négligé. Dans ce cas, le signal résultant de la superposition de 2 échos décalés à la fois en fréquence et en temps ne peut être considéré comme stationnaire que dans la partie centrale de recouvrement des 2 échos.

Deux résultats sont présentés figure 2 pour  $\alpha = 80^\circ$  et figure 3 pour  $\alpha = 50^\circ$ , où l'on retrouve :

- la transformée de Fourier du signal (a)
- l'algorithme L.S. appliqué au signal complet (b)
- l'algorithme L.S. appliqué à la portion du signal correspondant à la zone de recouvrement (c)

Dans le cas d'une analyse sur le signal complet, on identifie toujours 2 points brillants, mais ils ne sont plus correctement localisés.

Ce n'est que dans le dernier cas, qu'on retrouve un résultat satisfaisant.

On arrivera donc rapidement à une nouvelle limitation de cette méthode d'analyse spectrale, dont les pro-



priétés de super-résolution vont être contre balancées par le fait qu'on sera obligé de réduire la durée sur laquelle portera l'analyse.

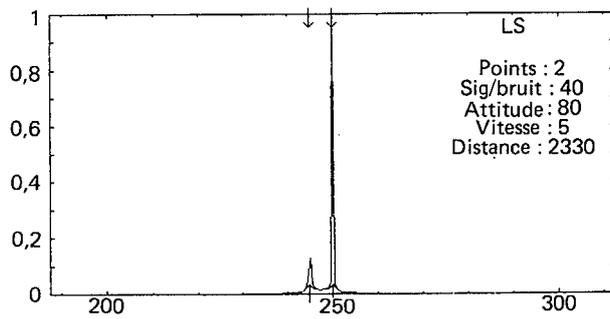
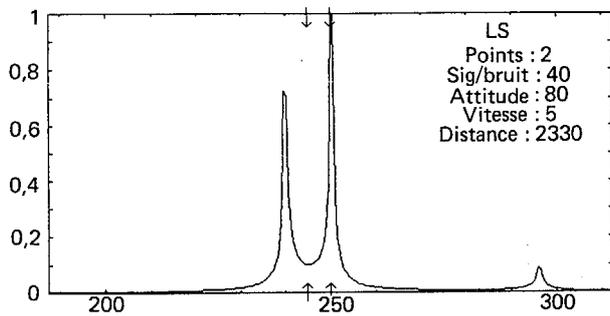
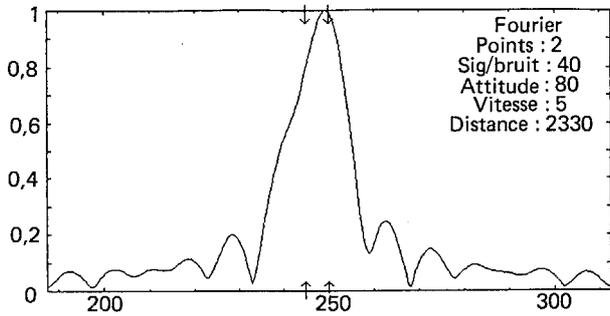


Fig. 2 - Analyse Doppler  $\alpha = 80^\circ$ .

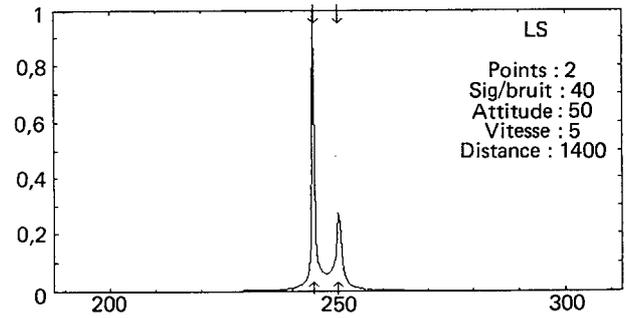
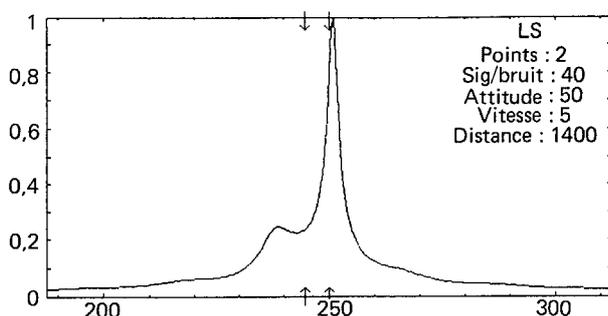
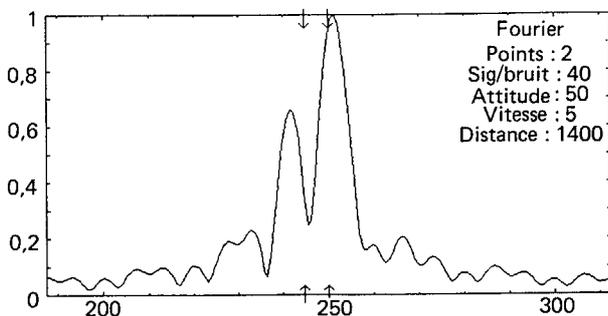


Fig. 3 - Analyse Doppler  $\alpha = 50^\circ$ .

En pratique, on n'obtiendra d'amélioration notable de résolution du Doppler différentiel que dans le cas des cibles vues par le travers. Dans les autres cas, la limite de la durée d'analyse réduira cet avantage. En outre une difficulté peut apparaître au moment de définir la tranche de signal stationnaire dans une application opérationnelle.

II-2 - NON-STATIONNARITE ET ANALYSE EN PROFONDEUR

Le paragraphe précédent a fait entrevoir l'importance du caractère non stationnaire de l'écho sonar sur cible étendue. Il devient donc naturel de chercher à utiliser explicitement cet effet pour localiser les points brillants à l'origine de chaque rupture de stationnarité. Cette méthode, utilisée dans divers domaines [3] comportera deux étapes. La première se résume à une modélisation autorégressive de durée  $\theta$ , située tout au début de l'écho (figure 4).

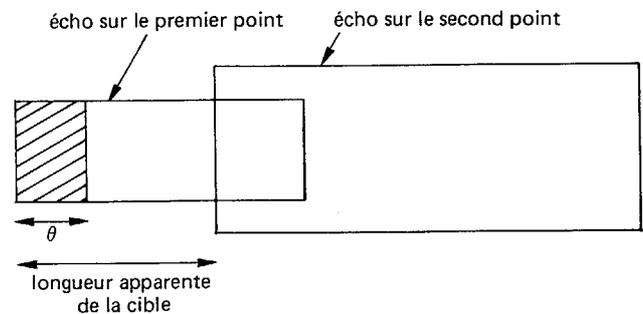


Fig. 4 - Longueur apparente de la cible.

On peut comparer cette première phase à l'apprentissage utilisé dans les procédures de reconnaissance de formes. La seconde comporte le calcul, au cours du temps, du carré de l'erreur de prédiction :

$$\epsilon_n^2 = \left( x_n - \sum_{i=1}^p a_i x_{n-i} \right)^2$$

où  $p$  est l'ordre du modèle. On suppose que la durée du signal émis correspond à une distance supérieure à la longueur de la cible. L'erreur de prédiction reste petite tant que la tranche de signal à partir de laquelle elle est calculée est de même structure que la tranche de signal d'apprentissage. Elle augmente, et permet une détection des points brillants de la cible lorsque ce n'est plus le cas. Ceci peut se produire pour deux raisons différentes: a) - lorsque la cible est vue sous une faible incidence, les points brillants sont pratiquement à même Doppler, et on détectera les ruptures de phase provoquées par l'apparition des 2ème, 3ème, nème sinusoides correspondant aux n-1 points brillants successifs.

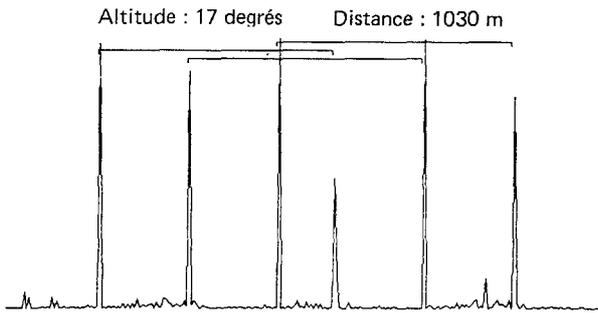


Fig. 5 – Analyse temporelle  $\alpha = 17^\circ$   $d = 1030$  m.

Ceci est illustré en figure 5.

La cible, vue sous une attitude de  $17^\circ$  et à 1030m de distance est composée de trois points brillants. Le début et la fin de chacun des échos est noté en haut de la figure. Ceux-ci sont correctement localisés.

b) - lorsque l'incidence augmente, l'écart de fréquence entre échos deviendra plus important, et l'évolution de l'erreur sera plus complexe.

La figure 6, correspondant à un angle d'attitude de  $69^\circ$  et une distance de 320m l'illustre bien. Paradoxalement, ceci conduira à rechercher une durée d'apprentissage minimale, la discrimination des fréquences devenant maintenant un phénomène gênant.

Les figures 7 et 8 montrent le résultat obtenu par cette méthode sur les échos rétrodiffusés par une cible en mouvement rectiligne uniforme (5 noeuds) observée sur 200 récurrences successives par un sonar situé à 300m sur une normale à la trajectoire. Chaque ligne de ces images représente, en niveaux de gris, l'intensité de l'erreur de prédiction. En début d'image, la cible, composée de points brillants est vue sous une incidence faible, puis passe par le travers, et est, par la suite, vue de l'arrière.

Altitude :  $69^\circ$  Distance : 320 m

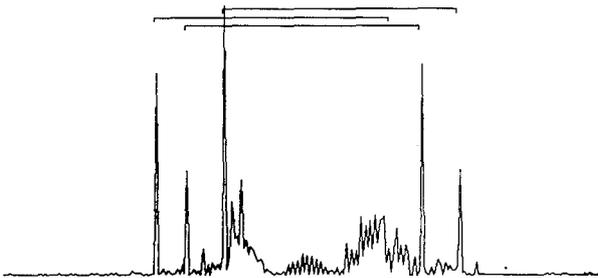


Fig. 6 – Analyse temporelle  $\alpha = 69^\circ$   $d = 320$  m.

On utilise pour l'apprentissage des 20 premiers points du signal, supposé numérisé après transposition à 1000Hz. L'ordre du filtre AR est pris égal à 10.

On retrouve ainsi un résultat analogue à l'image qu'aurait fourni une analyse en profondeur de la cible, à l'aide de signaux impulsionnels (ou large bande après compression d'impulsion).

La comparaison des deux figures permet d'évaluer l'influence du rapport signal à bruit : 20dB pour la figure 7, 30dB pour la figure 8.

La figure 9, enfin, montre l'effet de la présence de deux points brillants distincts, pendant la phase d'apprentissage.

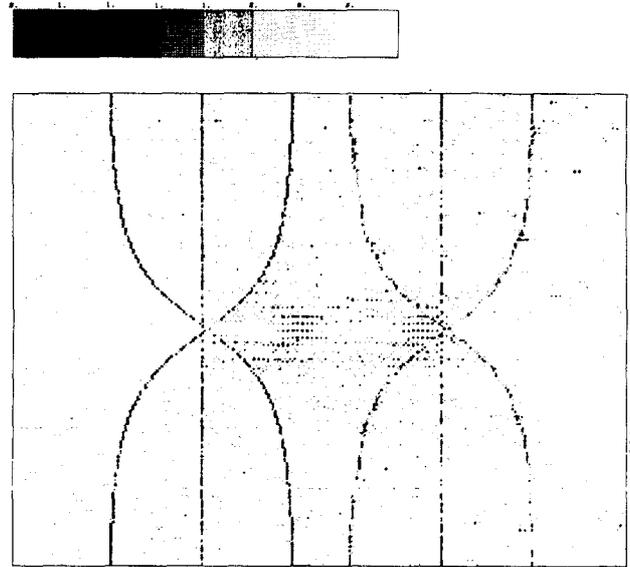


Fig. 7 – Cible à trois points S/B = 20 dB.

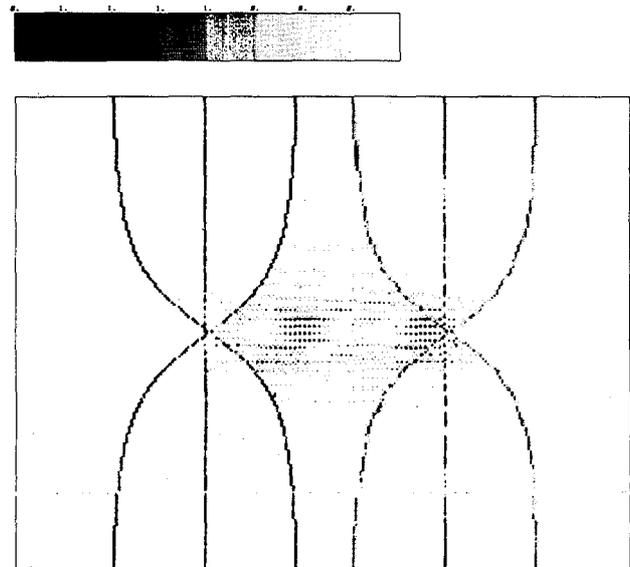


Fig. 8 – Cible à trois points S/B = 30 dB.

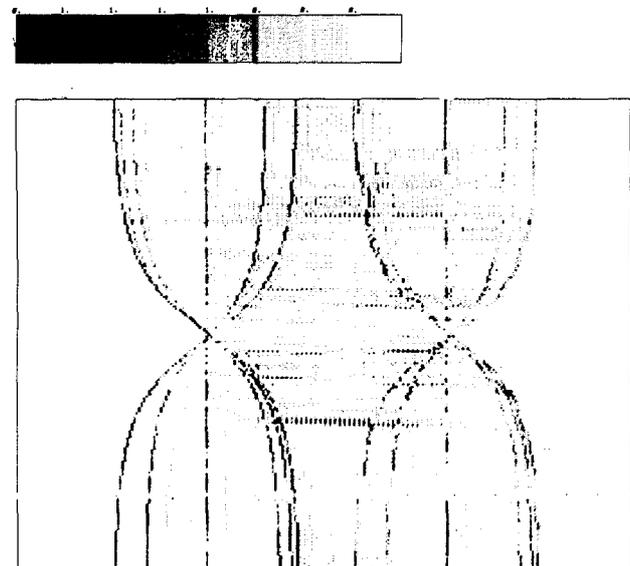


Fig. 9 – Cible à six points S/B = 30 dB.



## IMAGERIE SONAR DE CIBLES MOBILES

III - CONCLUSION -

En traitement de signal "traditionnel", deux notions sont classiquement séparées : à signal large bande correspond la notion de résolution distance, tandis que les signaux de fréquence pure sont associés à l'analyse Doppler, et n'ont pas de résolution temporelle.

La notion de modèle modifie quelque peu cette situation, concernant les signaux purement sinusoidaux, de durée finie.

Elle peut permettre d'abord dans certains cas favorables d'obtenir encore une séparation des points brillants de la cible par analyse de l'effet de Doppler différentiel.

Elle permet surtout, à rapport signal à bruit confortable (autour de 20dB et plus) d'obtenir une résolution temporelle inattendue si l'on s'en tient au schéma classique du filtre adapté.

La méthode que nous avons décrite convient comme aide à la classification des cibles étendues, à fai-

ble nombre de points brillants.

Elle permet par ailleurs de sauvegarder l'information du Doppler moyen de la cible, information perdue en particulier par certains systèmes à compression d'impulsion (modulation linéaire de fréquence par exemple).

REFERENCES

[1] GRANGER - Les théories modernes de l'analyse spectrale et leur application au radar - Colloque International sur le radar - Paris - 21-24 mai 1984

[2] MARPLE - A new autoregressive spectrum analysis algorithm - IEEE - Trans on acoustics, speech and signal processing, août 1980

[3] CASTANIE SOULE - Méthode de détection de non stationnarité - GRETSI 1983

