

HAUTE RESOLUTION POUR DES SIGNAUX RADAR NON
STATIONNAIRES

S. BAUDAS - C. DELHOTE

LE CENTRE THOMSON D'APPLICATIONS RADAR
6 rue Nieuport - 78143 VELIZY VILLACOUBLAY CEDEX**RESUME**

Sous certaines conditions, le signal reçu par un radar est un signal dont la fréquence instantanée peut varier très rapidement au cours du temps.

Une analyse fine de ce signal passe alors par la recherche d'algorithmes d'analyse spectrale haute résolution pour des signaux non stationnaires.

Plusieurs algorithmes sont examinés et leurs performances en résolution sont évaluées.

On envisage dans une première partie de rendre le signal stationnaire par démodulation en utilisant un développement limité du premier ordre de la fréquence instantanée. Les algorithmes classiques d'analyse spectrale de signaux stationnaires sont ensuite appliqués sur le signal démodulé.

Ces résultats sont ensuite étendus à l'analyse d'un signal non stationnaire lorsque la loi d'évolution en fréquence instantanée est connue et paramétrable.

SUMMARY

Under certain conditions, a radar received signal can exhibit a very fast varying instantaneous frequency.

A precise analysis of the signal includes the search of high resolution spectral analysis algorithms for non stationary signals.

Several algorithms are examined and their resolution performances evaluated.

To begin with, we depict how the signal can be transformed into a stationary-one by mean of demodulation using the first order approximation of its instantaneous frequency.

Usual spectral analysis algorithms for stationary signal are then applied to the demodulated signal.

This approach is finally applied to the analysis of a non-stationary signal when the instantaneous frequency evolution rule is known and can be modeled.

1. INTRODUCTION

Dans le traitement de certains signaux, les performances de détection et de dénombrement en situation multiségnal dépendent de la qualité de l'analyse spectrale, un point essentiel concerne alors le pouvoir de résolution fréquentielle en présence de signaux fortement non stationnaires. Depuis plusieurs années, des méthodes d'analyse spectrale haute-résolution de signaux stationnaires ont trouvé leur application dans le domaine du radar. Les méthodes classiques d'analyse spectrale dérivées de la Transformée de Fourier sont intrinsèquement limitées en résolution par l'inverse du temps d'ana-

lyse. Sous certaines conditions, notamment l'hypothèse de stationnarité au second ordre du processus, des méthodes améliorant la résolution sont proposées. Elles sont basées sur une modélisation autorégressive (AR) du processus étudié (1) (2). Cependant, l'hypothèse de stationnarité conduit dans la pratique à une limitation du temps d'analyse et donc à une limitation de la résolution due aux non stationnarités du signal. Afin de remédier à cette limitation, il est proposé un traitement simplifié mais adapté aux signaux non stationnaires. Partant d'un modèle du signal reçu, les paramètres de ce modèle sont estimés en supposant la présence d'un seul signal.



Le signal est ensuite stationnarisé en démodulant par le modèle estimé, le dénombrement est alors réalisé par analyse spectrale classique (Transformée de Fourier, AR ...).
Après avoir rappelé les hypothèses de travail et les limites de résolution des traitements classiques en présence de signaux non stationnaires, le traitement est décrit et testé par simulation.

2. GENERALITES

2.1 Hypothèses - On se place dans l'hypothèse où le signal reçu par le radar peut s'exprimer sous la forme :

$$s(t) = \sum_{i=1}^p A_i e^{j\phi_i} e^{j\omega_i(t)} + e(t) \quad \text{ou}$$

- p : nombre de cibles
- A_i, ϕ_i : amplitude et phase de chaque cible
- $\omega_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\omega_i(t)}{dt}$: fréquence instantanée
- $e(t)$: bruit blanc supposé gaussien de variance $\sigma^2 = \beta \cdot N_0$ dans la bande $[-B/2, B/2]$

Deux modèles d'évolution de la fréquence instantanée seront étudiés :

- Un modèle simple mais général de modulation linéaire de fréquence : $f_i(t) = f_i + \alpha_i \cdot t$

(α_i : pente de modulation)

La durée de validité de ce modèle est limitée par $T \ll 2 \alpha / \Delta f_{\max}(f)$

- Un modèle plus complet, mais plus spécifique, adapté au radar étudié. Par exemple, pour un radar bistatique, sous l'hypothèse d'un certain type de trajectoire, la loi d'évolution de la fréquence Doppler peut s'exprimer simplement en fonction des paramètres de position de la cible.
La durée de validité de ce modèle est donnée par le temps pendant lequel l'hypothèse faite sur la trajectoire est vraie.

2.2 Traitement optimal - Dans le cas où la loi d'évolution de la fréquence Doppler est connue et paramétrable, une méthode de dénombrement passe alors par l'estimation de ces paramètres à l'aide du maximum de vraisemblance.

En posant $\omega_i(t) = \omega(t, \vec{\theta}_i)$ ($\vec{\theta}_i$: paramètres)

Le maximum de vraisemblance aboutit à chercher le nombre de cibles p et les paramètres ($\vec{\theta}_i$ $i=1, p$) qui maximisent :

$$S^T R^{-1} S$$

avec : S : vecteur $S_i = \int s(t) e^{-j\omega(t, \vec{\theta}_i)} dt$
et : R : matrice $p \cdot n \otimes p \cdot n$; $R_{kl} = \int e^{j(\omega(t, \vec{\theta}_k) - \omega(t, \vec{\theta}_l))} dt$

n : nombre de paramètres

Cette méthode requiert une puissance de calcul importante et est difficilement implantable.

3. TRAITEMENT ADAPTE AUX SIGNAUX STATIONNAIRES

La résolution fréquentielle des traitements

d'analyse spectrale classique est : $1/q \cdot T$

T : Durée d'analyse

$g = 1$ dans le cas de la Transformée de Fourier

$g \gg 1$ pour des traitements haute résolution (AR..)

Pour des signaux non stationnaires, la durée T et donc la résolution sont limitées.

Par exemple, pour deux signaux modulés linéairement en fréquence, de même pente de modulation :

$$f_1(t) = f_1 + \alpha t, \quad f_2(t) = f_2 + \alpha t \quad (f_2 > f_1, \alpha > 0)$$

Les signaux seront séparés fréquentiellement si :

$$f_2 - (f_1 + \alpha T) > 1/q \cdot T$$

Soit : $\Delta f > \alpha T + 1/q \cdot T \quad (\Delta f = f_2 - f_1)$

Il existe une durée optimale $T_{opt} = \sqrt{1/q \alpha}$ pour laquelle la résolution est minimale.

Ce maximum vaut $2 \sqrt{\alpha/q}$ (résolution $\geq 2 \sqrt{\alpha/q}$)

4. TRAITEMENT SIMPLIFIE ADAPTE AUX SIGNAUX NON STATIONNAIRES

4.1 Modélisation par une modulation linéaire de fréquence

Dans un premier temps, les paramètres du modèle (f, α cf § 2.1) sont estimés en supposant l'écho radar formé d'une seule cible.

Deux variantes sont proposées pour ce calcul :

- un traitement direct sur le signal : (3)

$$f, \alpha : \text{maximise } \left| \int s(t) e^{-2\pi j(f t + \alpha \frac{t^2}{2})} dt \right|^2$$

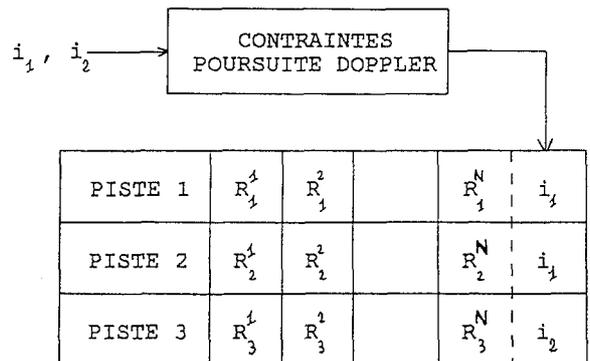
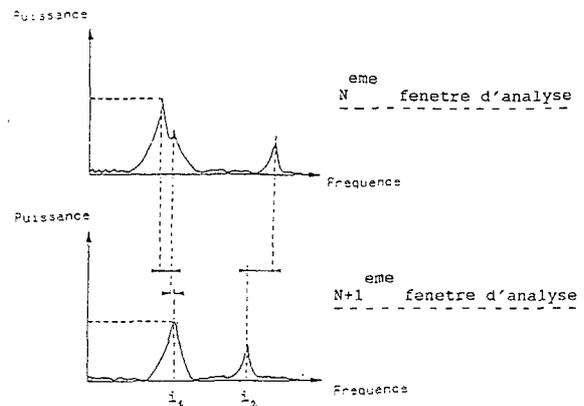
- un traitement sur la fréquence instantanée :

Pour cela, une représentation temps-fréquence du signal est obtenue à partir de Transformées de Fourier successives (figure 5).

Un pistage de la fréquence instantanée en fonction du temps est mis en oeuvre pour fournir une courbe fréquence instantanée en fonction du temps.

Le pistage de la fréquence Doppler utilise l'information issue de la Transformée de Fourier et consiste à comparer les raies excitées d'une fenêtre d'analyse à la suivante et à former des pistes à partir des séquences de répliques.

La compatibilité porte sur des contraintes d'association logique (variation de fréquence, puissance ...) d'une récurrence à la suivante.



Une recherche sélective des zones, où le modèle linéaire est valide, est effectuée sur chacun des ensembles de mesures cohérentes, f et α sont alors estimés par un critère des moindres carrés.

On note $(\hat{f}, \hat{\alpha})$ le couple d'estimés.

Le signal est ensuite stationnarisé par démodulation:

$$\hat{s}(t) = s(t) \cdot e^{-2\pi j(\hat{f}t + \hat{\alpha}t^2/2)}$$

Le nouveau signal est traité par les méthodes d'analyse spectrale classiques (FFT, AR, ...).

Afin de réduire la cadence d'échantillonnage, le signal est filtré par un filtre passe-bande et sous-échantillonné (4).

L'ordre de grandeur de la résolution obtenue peut être estimé par un raisonnement approximatif. En effet, l'estimé de α est entâché d'une erreur. Dans le cas d'une seule cible, cette erreur est limitée inférieurement (3) (Bornes de Cramer - Rao)

$$\sigma_\alpha^2 \geq \frac{45}{2\pi^2} \cdot \frac{1}{(E/N_0)} \cdot \frac{1}{T^4}$$

Après stationnarisation, en appliquant le raisonnement analogue au § 3 avec une modulation résiduelle σ_α , il vient :

$$\Delta f > \frac{1}{8T} + \sigma_\alpha \cdot T$$

$$\text{soit : } \Delta f > \frac{1}{T} \left(\frac{1}{8} + \sqrt{\frac{45}{2\pi^2} \frac{1}{(E/N_0)}} \right)$$

On retrouve un comportement de la résolution en $1/T$, mais la durée d'analyse T est limitée par la durée de validité du modèle (§ 2.1).

4.2 Modèle global

La démarche est identique au paragraphe précédent

- choix du modèle de l'évolution de la Doppler au cours du temps (§ 2.1),
- pistage de la fréquence instantanée dans le plan temps fréquence même en situation complexe multi-signaux,
- à partir de la courbe fréquence instantanée en fonction du temps que donne la piste retenue, on estime par les moindres carrés les paramètres du modèle,
- stationnarisation du signal par démodulation avec le modèle estimé :

$$s'(t) = s(t) \cdot e^{-2\pi j \int_0^t f(u, \hat{\theta}) du}$$
- dénombrement par analyse spectrale classique sur le signal stationnarisé.

5. SIMULATIONS

5.1 Signaux synthétiques

Les signaux simulés sont formés de deux signaux modulés linéairement en fréquence de rapport S/B 40 et 20 dB, de fréquences initiales f_1 et f_2 différentes et de même pente de modulation α . Ils sont analysés sur une durée T . Deux cas sont envisagés :

Cas 1 : $\Delta f > 2\sqrt{\alpha}$

Conformément au § 3, pour une durée d'analyse trop grande ($T \gg T_{opt}$), les deux signaux ne sont pas séparés par FFT (figure 1) et pour une durée d'analyse optimale $T = T_{opt}$, les deux signaux peuvent être séparés par FFT (figure 2).

Cas 2 : $\Delta f < 2\sqrt{\alpha}$

Malgré le choix optimal de la durée d'analyse, les deux signaux ne peuvent être séparés par analyse spectrale classique (figure 3).

La méthode combinant les opérations de pistage et de stationnarisation par démodulation permet d'obtenir une bonne séparation (figure 4).

5.2 Analyse de plusieurs motifs

Les signaux étudiés sont formés de deux motifs disjoints dans le plan temps-fréquence (figure 5).

Chaque motif est formé de cinq signaux non séparés par Transformée de Fourier classique.

Grâce à la méthode de pistage multicibles, les deux motifs peuvent être analysés séparément.

Après estimation des paramètres du modèle, stationnarisation du signal et filtrage passe bande, chaque motif est analysé :

Figures 6 et 8 : TF sur le 1er et le 2ème motif
 Figures 7 et 9 : AR sur le 1er et le 2ème motif
 (FBLP : Forward Backward Linear Predictor)

On constate un bon dénombrement par la TF et un doublement des pics néfaste pour la méthode FBLP.

6. CONCLUSIONS

Par sa simplicité et sa robustesse, la méthode présentée qui associe les opérations de pistage de la fréquence Doppler et de stationnarisation du signal est bien adaptée aux contraintes temps réel du traitement du signal radar.

Elle présente l'originalité de pouvoir suivre simultanément plusieurs lois d'évolution Doppler dans le temps. Une amélioration sensible de la résolution est obtenue dans le traitement des signaux non-stationnaires.

Remerciements

Les auteurs adressent leurs remerciements au Service Technique des Télécommunications et des Equipements aéronautiques (STTE) qui leur a fourni l'occasion de traiter ce sujet et qui a bien voulu autoriser la parution de ce texte.

REFERENCES

- (1) S.M. KAY, SL MARPLE :
Spectrum Analysis : a modern perspective
Proc IEEE vol 69 n° 11 - Nov. 81
- (2) SL MARPLE :
A new autoregressive spectrum analysis algorithm
IEEE Vol ASSP-28 - Aug. 80
- (3) Theagenis J. ABATZOGLOU :
Fast Maximum Likelihood joint estimation of frequency and Frequency Rate
IEEE Trans - Vol AES - 6 - Nov 86
- (4) Maureen P. QUIRK - Bede LIU :
Improving resolution for autoregressive spectral estimation by decimation
IEEE ASSP - 31 - n° 3 - June 83.

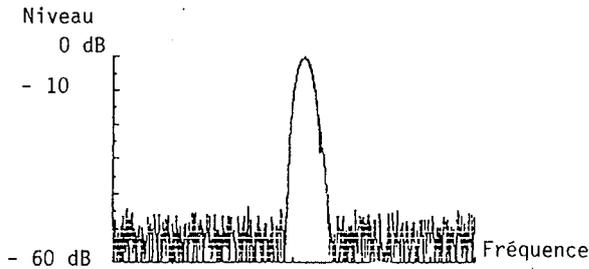


FIG 1 : Transformée de Fourier de 2 chirps
S/B : 40 dB et 20 dB (avant intégration)
 $\Delta f > 2\sqrt{\alpha}$; $T \gg T_{opt}$

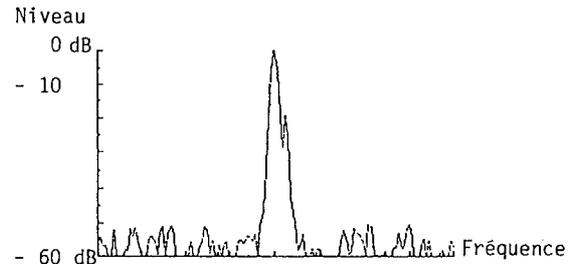


FIG 2 : Transformée de Fourier de 2 chirps
S/B : 40 dB et 20 dB (avant intégration)
 $\Delta f > 2\sqrt{\alpha}$; $T = T_{opt}$

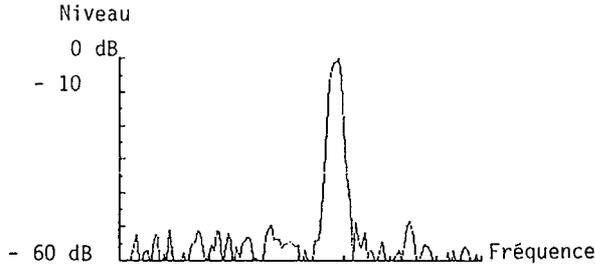


FIG 3 : Transformée de Fourier de 2 chirps
S/B : 40 dB et 20 dB (avant intégration)
 $\Delta f < 2\sqrt{\alpha}$; $T = T_{opt}$

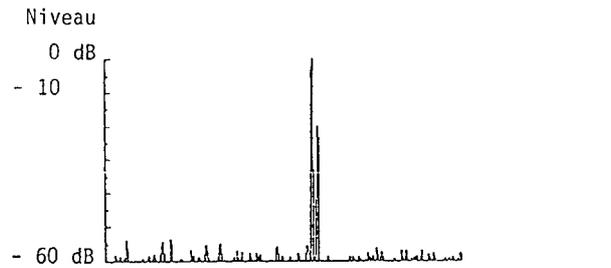


FIG 4 : Traitement adapté sur 2 chirps
S/B : 40 dB et 20 dB (avant intégration)
 $\Delta f < 2\sqrt{\alpha}$

FIG 5 : Analyse de 2 motifs

- . Représentation Temps-Fréquence par T.F glissante
- . Chaque motif est formé de 5 signaux

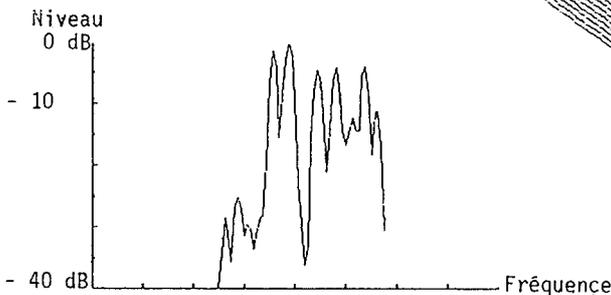
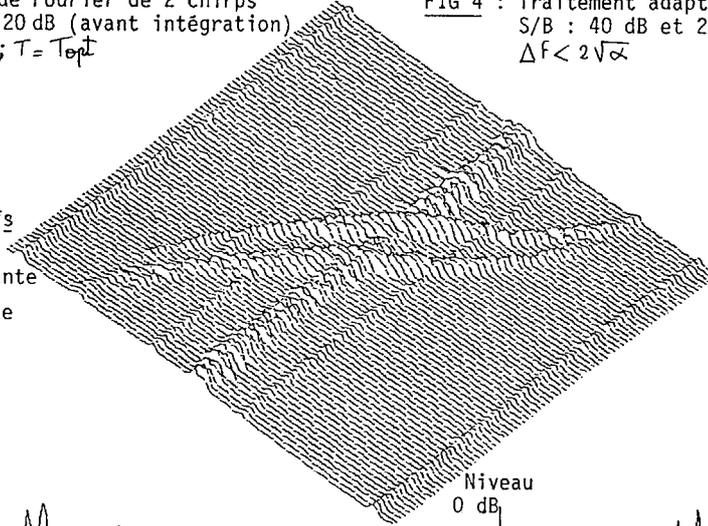


FIG 6 : Analyse du 1er motif par traitement adapté suivi d'une TF.

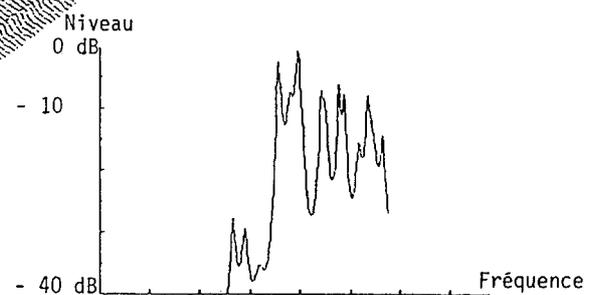


FIG 7 : Analyse du 1er motif par Traitement adapté suivi d'une analyse AR (FBLP d'ordre N/3)

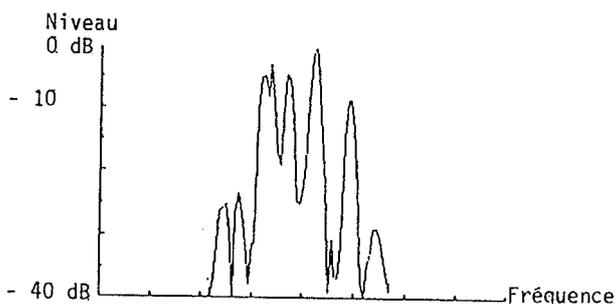


FIG 8 : Analyse du 2d motif par Traitement adapté suivi d'une TF.

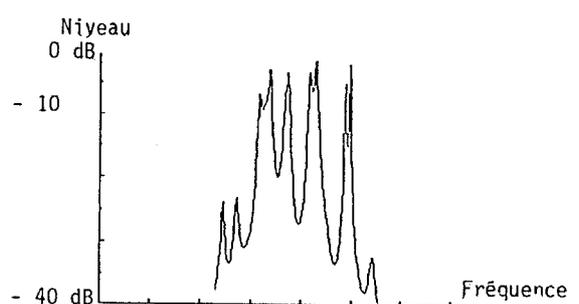


FIG 9 : Analyse du 2d motif par Traitement adapté suivi d'une analyse AR (FBLP d'ordre N/3).