

## TREIZIÈME COLLOQUE GRETSI - JUAN-LES-PINS DU 16 AU 20 SEPTEMBRE 1991

ANALYSE RADAR DE CIBLES AERIENNES  
PAR TRAITEMENT SAR INVERSE (ISAR)J.P. HENRY, M.Y. LIENHART,  
M. PIERRE, D. SOBRINOTHOMSOM-CSF  
DIVISION SYSTEMES DEFENSE ET CONTROLE7 Rue des Mathurins, BP 10  
92223 - Bagneux- France

## RÉSUMÉ

## ABSTRACT

RESUME

L'article expose les résultats d'une étude de traitement radar visant à obtenir selon la technique ISAR une image transverse de cibles aériennes. Deux types de traitement sont définis : cohérent, avec compensation de vitesse, pour obtenir le profil de la cible, non cohérent pour mesurer l'extension de la cible. Après avoir précisé les conditions de mise en oeuvre du traitement dans un radar, les principes théoriques dégagés sont appliqués à des données réelles obtenues à l'aide d'un radar terrestre de poursuite fonctionnant en bande X.

INTRODUCTION

La technique de traitement SAR inversé (ISAR) permet, par analyse spectrale de longue durée, d'établir une représentation d'un écho radar selon l'axe transverse à l'axe de visée radar.

Le phénomène exploité est l'écart de fréquence Doppler affectant les réponses issues de chacun des points brillants composant l'écho, qui est proportionnel à l'écart de distance transverse séparant les points brillants.

Dans un contexte adéquat d'utilisation (notamment pour une cible de présentation suffisamment transversale), un traitement ISAR permet d'accéder à une mesure de l'extension transverse des cibles, et de façon plus sophistiquée au profil transverse des points brillants. C'est donc une des techniques de base à considérer en matière de Reconnaissance non coopérative de cible.

L'étude sur laquelle s'appuie cet article avait pour objet de définir différents types de traitements ISAR, d'en préciser les conditions d'insertion dans un radar doté d'un mode de poursuite, et de valider les principes des traitements sur des enregistrements de cibles réelles obtenues à l'aide d'un radar de poursuite fonctionnant en bande X. Le cadre de l'étude était limité, en première approche, au traitement d'un écho monocible en déplacement rectiligne.

Dans un premier temps, l'article justifie les principes de base des traitements à partir de l'expression analytique des signaux renvoyés par la cible. On précise, dans une deuxième étape, les conditions pratiques de mise en oeuvre de ces traitements dans un radar. Dans une troisième partie, sont rapportés les résultats de simulation des traitements sur des signaux réels. Enfin, la conclusion envisage les perfectionnements nécessaires pour appliquer ces traitements à des échos multicibles et à des cibles manœuvrantes.

SUMMARY

This paper reports the results of a study aiming at providing cross-range features of aircrafts through radar ISAR processing.

Two types of processing are outlined : coherent processing, requiring velocity compensation, and providing the complete target profile; non-coherent processing enabling measurement of the target cross-range extent. Practical conditions for implementing the processing in a radar are described.

Finally, the theoretical principles of the processing are applied to recorded real data, obtained through an X-band ground-based tracking radar.

PRINCIPES THEORIQUES DU TRAITEMENTExpression des signaux renvoyés par la cible

Le traitement ISAR s'appuie sur une modélisation de la cible analysée sous forme d'une collection de K points brillants, stationnaire pendant le temps d'analyse.

Si l'on suppose qu'à l'instant t le point brillant no k est situé à une distance  $R_k(t)$  du radar, les échantillons utiles obtenus après filtrage adapté sont issus d'un signal de la forme :

$$s(t) = \sum_{k=1}^K c_k e^{-j4\pi/\lambda R_k(t)}$$

où :

- $\lambda$  est la longueur d'onde d'émission, supposée fixe pour tous les échantillons traités ;
- $c_k$  est le coefficient complexe de rétrodiffusion du kième point brillant.

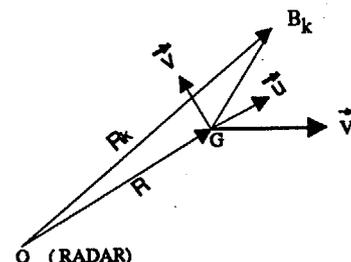


Figure 1



Selon les notations de la figure 1, en utilisant un point arbitraire lié à la cible, de position  $G(t)$  et de vitesse  $V(t)$  à l'instant  $t$ , et en désignant par  $B_k(t)$  la position du point brillant no  $k$ , la distance  $R_k(t)$  peut s'approximer sous la forme :

$$R_k(t) = R(t) + dr_k(t)$$

où :  
 -  $R(t)$  est la distance du point  $G(t)$ , supposée grande devant  $|G(t)B_k(t)|$ ,  
 -  $dr_k(t) = \frac{G(t)B_k(t)}{G(t)B_k(t)} \cdot u(t)$ .

On peut alors décomposer  $s(t)$  sous la forme :

$$s(t) = c_g(t) c(t)$$

avec :

$$c_g(t) = e^{-j4\pi/\lambda R(t)}$$

$$c(t) = \sum_{k=1}^K c_k e^{-j4\pi/\lambda dr_k(t)}$$

En supposant un mouvement rectiligne de la cible et l'absence de mouvement de roulis-tangage, le vecteur  $G(t)B_k(t)$  est constant. L'écart de distance radiale  $dr_k(t)$  peut alors s'exprimer sous forme du développement limité au deuxième ordre :

$$dr_k(t) = dr_k(0) + t \Omega(0) dt_k + E_k(t)$$

où :  
 -  $dt_k = \frac{GB_k \cdot \vec{v}(0)}{GB_k \cdot \vec{v}(0)}$  (distance transverse du point no  $k$ ),  
 -  $\Omega(t) = d(\theta)(t)/dt = -\sin(\theta(t)) V(t)/R(t)$   
 -  $E_k(t) = t^2/2 \Omega(0) \gamma(0)/V(0) dt_k$ , avec  $\gamma(t) = d(V(t))/dt$

Parallèlement, la distance  $R(t)$  peut s'approximer par :

$$R(t) = R(0) + B t + A t^2$$

avec :

$$A = 1/2 [-V(0)\sin(\theta(0)) + \gamma(0) \cos(\theta(0))]$$

$$B = V(0)\cos(\theta(0))$$

Le terme du deuxième ordre  $E_k(t)$  étant négligeable devant celui de  $R(t)$ , on peut donc approximer les termes de la réponse  $s(t) = c_g(t) \cdot c(t)$  de la cible sous la forme :

$$c_g(t) = c e^{-j4\pi/\lambda (At+B)t}$$

$$c(t) = \sum_{k=1}^K c_k e^{-j2\pi f_k t} \quad \text{où } f_k = 2/\lambda \Omega(0) dt_k$$

**Types de traitement envisagés**

D'après les relations précédentes, le profil en distance transverse des points brillants de la cible est directement relié au spectre de fréquence Doppler du signal  $c(t)$ . La distance transverse d'un point brillant se déduit de la fréquence de la raie associée dans le signal  $c(t)$  selon le coefficient de conversion fréquence-distance transverse :

$$C(\theta, R, V) = \lambda R / 2 V \sin(\theta) \quad (m/Hz)$$

Dans ces conditions, on peut envisager, à partir de  $s(t)$ , deux types de traitement fournissant une richesse d'information en rapport avec la complexité des opérations nécessaires.

Le traitement qualifié de cohérent consiste à récupérer (à un facteur multiplicatif près)  $c(t)$  à partir de  $s(t)$ , pour obtenir par analyse spectrale de  $c(t)$  le profil transverse de la cible. Ceci nécessite une estimation de la phase de  $c_g(t)$ , pour compenser dans  $s(t)$  la contribution de  $c_g(t)$ . Cette opération revient à compenser l'effet Doppler induit par le mouvement d'ensemble de la cible, qui affecte l'ensemble des points brillants ; d'après l'expression théorique des signaux, à l'échelle de temps nécessaire pour résoudre l'écart différentiel entre points brillants, la phase Doppler d'ensemble évolue quadratiquement (i.e. la fréquence

Doppler évolue linéairement) et la compensation doit tenir compte de ce type d'évolution.

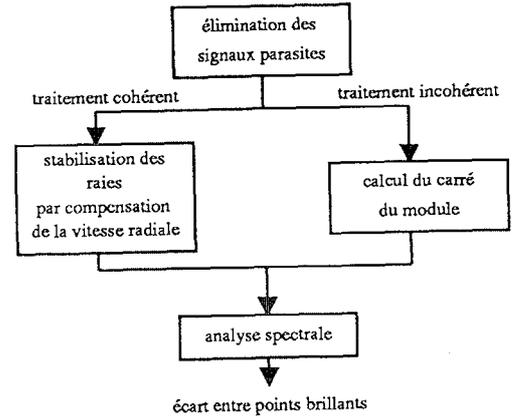


Figure 2 : Synoptique des traitements ISAR

Si l'information recherchée peut se limiter à l'extension transverse de l'écho, il est suffisant de procéder à une analyse spectrale de  $|c(t)|^2$  c'est-à-dire de  $|s(t)|^2$ , ce qui évite l'opération de compensation. Le spectre de  $|c(t)|^2$  étant l'autocorrélation de celui de  $c(t)$ , la localisation de la raie extrême de  $|c(t)|^2$  détermine l'écart de fréquence entre les raies extrêmes de  $c(t)$ . Dans ce cas, le traitement est qualifié de non cohérent, et on peut envisager d'exploiter les informations spectrales accessibles au-delà d'une simple mesure d'extension transverse.

En incluant dans la chaîne de traitement un préfiltrage éliminateur de parasites et renforçant le rapport S/B des échantillons analysés, les deux types de traitement sont schématisés sur la figure 2.

**Pouvoir de résolution du traitement**

Dans les deux cas, le pouvoir de résolution dépend du temps total d'analyse et de la qualité de la méthode d'analyse spectrale utilisée.

Si l'on utilise une analyse de Fourier, le pouvoir de résolution en distance transverse est l'inverse du facteur  $C(\theta, R, V)$  (temps de mesure nécessaire à une résolution de 1 m). Il est d'autant plus élevé que la longueur d'onde est faible, et que la cible est proche, rapide et en déplacement transversal. La figure 3 représente le facteur  $C(\theta, R, V)$  obtenu en bande X en fonction de la présentation d'une cible se déplaçant à 300 m/s.

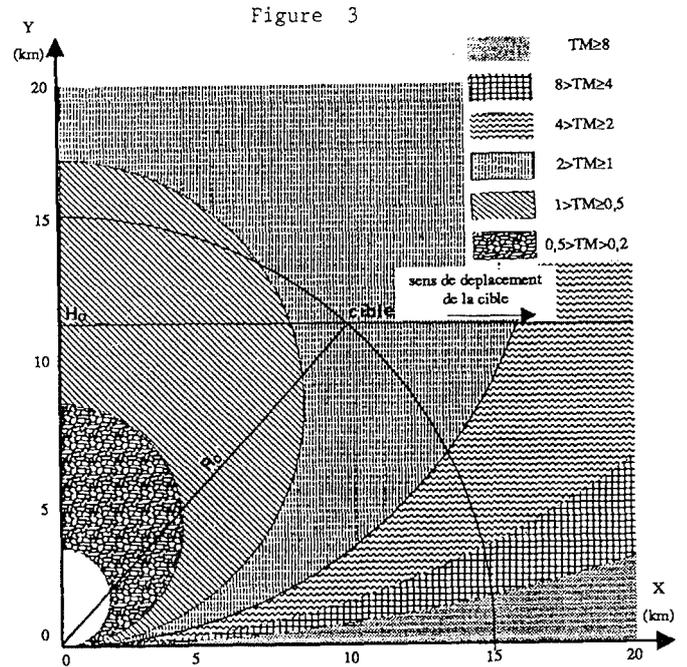


Figure 3

Le recours à une méthode haute résolution permet de diminuer le temps de mesure  $T_m$  nécessaire pour une résolution  $\Delta d_t$  selon la formule :

$$T_m > C(\theta, R, V) / \Delta d_t \cdot \rho \quad (\rho = 1 \text{ pour Fourier})$$

Des valeurs de  $\rho$  de l'ordre de 3 à 5 sont accessibles à l'aide d'une méthode de détermination de raies basées sur :

- une modélisation AR (algorithme de Marple) permettant de localiser les raies ;
- un ajustement au sens des moindres carrés pour obtenir l'amplitude complexe des raies.

### CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE DANS UN RADAR

#### Compatibilité avec le séquençement

La fonction de mesure remplie par le traitement ISAR doit être supportée par un mode de poursuite pour obtenir un écho de la cible sur le temps  $T_m$  nécessaire à la résolution distance voulue.

Les échantillons de l'écho utilisés pour l'analyse spectrale doivent :

- être issus d'un signal d'excitation émis à fréquence fixe ;
- prélevés à des instants réguliers (sauf à recourir à des méthodes d'analyse supportant un échantillonnage non uniforme).

En conséquence, il faut s'assurer de la disponibilité, pendant la totalité du temps d'analyse, de rafales émises de façon régulière à fréquence fixe. Si l'on suppose que le préfiltrage d'entrée consiste à extraire d'une rafale un seul échantillon filtré, le rythme d'extraction  $F_e = 1/T_e$  correspond au rythme d'émission des rafales de signal utilisé pour le traitement ISAR.

#### Rythme d'extraction des échantillons filtrés

Il y a lieu d'insister sur le fait qu'il n'est pas besoin d'éclairer la cible en permanence et que le sous-échantillonnage au rythme  $F_e$  permet de limiter considérablement la charge de calcul de l'analyse spectrale. Cependant, ce sous-échantillonnage peut s'accompagner d'un repliement spectral, ce qui en distance transverse correspond à une ambiguïté de mesure modulo :

$$\Delta d_a (F_e) = F_e \cdot C(\theta, R, V).$$

Il faut donc s'assurer que, par le choix de  $F_e$ , cette ambiguïté n'est pas supérieure à l'extension maximum d'un écho radar. Or, au travers du filtrage spatial réalisé par l'antenne du radar, la distance transverse instrumentée à une distance  $R$  du radar est pratiquement limitée à  $\Delta d_t = 2 \cdot \theta_{3dB} \cdot R$ , où  $\theta_{3dB}$  est la largeur angulaire du lobe.

La distance transverse ambiguë étant minimum pour  $\theta = 90^\circ$ , la condition  $F_e > \Delta d_t / C(90^\circ, R, V)$  s'écrit :

$$F_e > 4 \theta_{3dB} V / \lambda.$$

#### Préfiltrage d'entrée

Le préfiltrage a pour objet d'extraire du signal reçu l'écho utile de cellule tout en accentuant le contraste entre le signal utile et les parasites (bruit thermique, fouillis). On sait par ailleurs que l'écho renvoyé par un avion à réaction peut s'accompagner de la présence de raies de réacteur, d'autant plus puissantes que la cible est en présentation radiale, ce qui limite la gêne apportée par ce phénomène dans le cas d'emploi pratique du traitement ISAR (où les cibles sont préférentiellement en configuration transversale).

Le préfiltrage est supposé réalisé au travers d'un banc de  $N$  filtres traitant une rafale de  $N$  impulsions émises au rythme  $Fr$  (on a donc  $Fr > N F_e$ ). L'échantillon sélectionné est celui correspondant au filtre d'amplitude maximum. Si par souci de robustesse, on souhaitait

s'affranchir d'échos de fouillis (voire de raies de réacteurs) plus puissantes que l'écho de cellule, il serait possible d'après les mesures de télémétrie de restreindre les filtres sélectionnables.

Le nombre  $N$  d'impulsions traitées fixe la qualité de réjection des parasites. Par ailleurs, le fait que  $F_e < Fr/N$  garantit que la largeur  $Fr/N$  du filtre sélectionné est supérieure à l'extension maximale des échos.

#### Compensation de la phase due à la vitesse radiale de la cible

Cette opération, propre au traitement cohérent, consiste à estimer, dans chaque échantillon filtré, la phase induite par le mouvement d'ensemble de la cible et à compenser cette phase dans l'échantillon avant d'alimenter l'analyse spectrale.

L'opération doit donc s'effectuer au rythme  $F_e$  ; mais comme l'évolution de la phase est quadratique sur l'ensemble de la mesure, il y a tout intérêt à profiter de la connaissance de cette évolution sur l'ensemble des échantillons pour parfaire l'estimation.

En pratique, l'objet de la compensation est donc d'estimer les paramètres  $A$  et  $B$  d'évolution de la phase. Bien que ces paramètres soient reliés aux paramètres cinématiques de la cible, la précision requise pour l'opération de compensation ne permet pas d'estimer  $A$  et  $B$  au travers d'informations issues de la télémétrie et du pistage.

Pour estimer  $A$  et  $B$  à partir du signal radar, on procède aux opérations suivantes :

- calcul au rythme  $F_e$  de la fréquence Doppler instantanée des échantillons filtrés, à l'aide d'un échantillon supplémentaire de préfiltrage en sortie du même filtre que l'échantillon nominal (ce qui impose une impulsion supplémentaire dans chaque rafale et une opération de filtrage supplémentaire) ;
- régression linéaire sur les fréquences instantanées ainsi calculées (qui, aux fluctuations de mesure près, évoluent linéairement avec le temps).

### SIMULATION DU TRAITEMENT SUR DONNEES REELLES

#### Conditions d'enregistrement et de préfiltrage.

Les résultats présentés sont relatifs à l'exploitation d'un enregistrement en bande  $X$  d'un avion de type Falcon 10, situé à  $R=7,4$  km du radar de poursuite, et se déplaçant transversalement ( $\theta=78^\circ$ ) à une vitesse  $V=154$  m/s (données issues de la télémétrie et du pistage).

Le radar émet de façon permanente une succession de rafales à fréquence fixe, avec une fréquence de récurrence des impulsions de l'ordre de 7 kHz. Le signal radar reçu est enregistré numériquement, par échantillonnage à la fréquence de récurrence en sortie de filtre adapté.

A la distance  $R$  considérée, la distance transverse instrumentée au travers du lobe d'antenne est de l'ordre de 590 m, tandis que l'ambiguïté minimum en distance transverse (cible parfaitement transversale) est de 5400 m pour la fréquence de récurrence utilisée.

Par conséquent, un facteur de sous-échantillonnage de 9 par rapport à la fréquence de récurrence, en sortie de préfiltrage, garantit l'absence de repliement dans la distance transverse instrumentée. Pour des raisons pratiques de structure des rafales et d'ordre de FFT, le préfiltrage porte sur des blocs de 8 impulsions consécutives, avec un facteur de sous-échantillonnage de 11.

#### Traitements sur 0,4 seconde

Le figure 4 représente respectivement l'amplitude et le spectre du signal avant préfiltrage, obtenus pour une durée 0,4 s. Sont décelables sur ces figures les contributions de l'écho utile, composé de deux modes principaux, et de raies parasites.

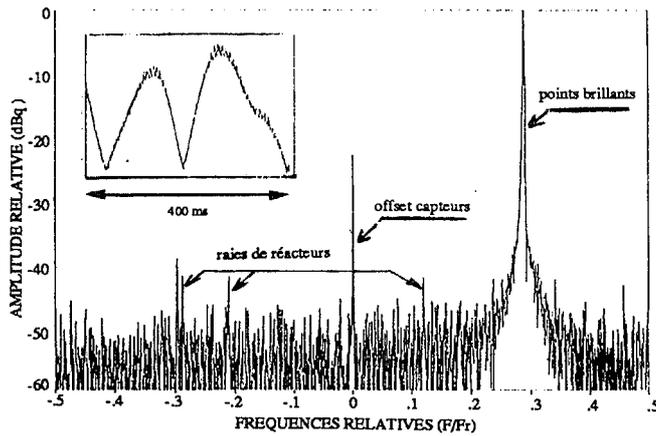


FIGURE 4: EVOLUTION TEMPOREL (MEDAILLON) ET ANALYSE SPECTRALE ASSOCIEE D'UN SIGNAL MONOCIBLE BRUT

Après préfiltrage et sous-échantillonnage, on obtient le spectre de la figure 5 sur lequel ont disparu les raies parasites et où l'on note l'existence d'un troisième mode mineur. La largeur spectrale des modes principaux, supérieure à celle due à la fenêtre de pondération, traduit la variation du spectre due au mouvement de la cible pendant le temps d'analyse.

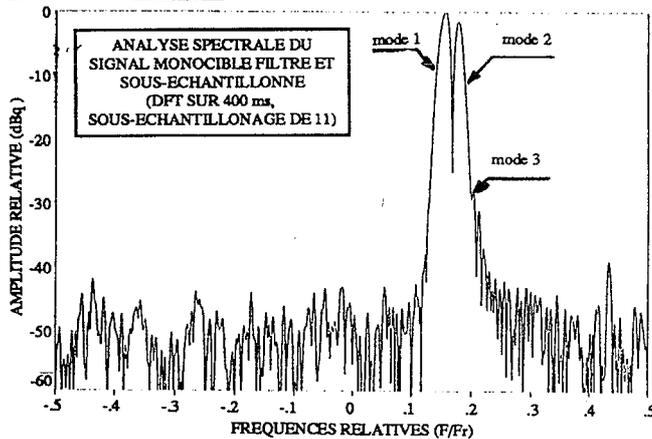


FIGURE 5

Après compensation de vitesse, on obtient les spectres de Fourier et autorégressifs de la figure 6.1. L'analyse haute résolution confirme que les deux modes principaux, affinés par la compensation de vitesse, correspondent à deux raies très étroites, dont l'espacement spectral équivaut à un écart en distance transverse de 5 m. Sur l'axe longitudinal de l'avion (qui mesure environ 13 m), on aboutit à la mise en évidence de deux points brillants prépondérants séparés de 5,1 m.

Le traitement non cohérent confirme ces résultats, comme le montre les spectres de la figure 6.2 relatifs au module au carré du signal préfiltré.

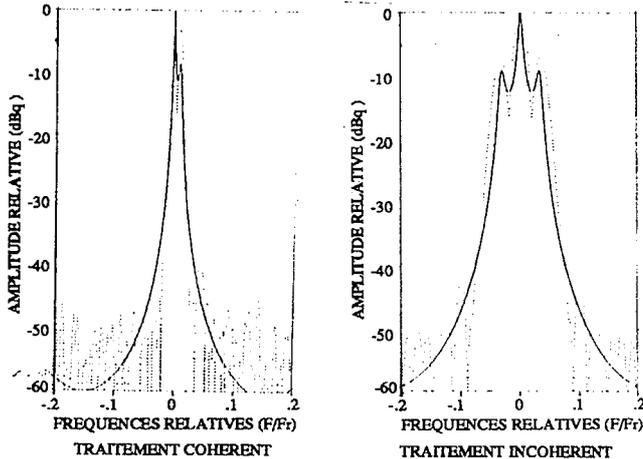


FIGURE 6.1

FIGURE 6.2

### Apport de la haute résolution

La durée d'analyse des traitements précédents permettait une résolution de 0,8 m par analyse de Fourier, suffisante pour séparer les points brillants effectifs de la cible utilisée.

L'analyse haute résolution, outre son apport pour qualifier la pureté spectrale des signaux analysés, permet la séparation des points brillants avec un temps de mesure sensiblement réduit. Typiquement, pour le signal analysé, l'isolation des deux points brillants reste possible pour des temps d'analyse de l'ordre de 65 ms, soit un gain en résolution de 6. Par ailleurs, la possibilité d'effectuer une analyse sur des portions de signal écourtées permet d'analyser la stationnarité de la collection de points brillants au cours du temps.

Dans notre cas, il apparaît que la distance entre les deux points brillants principaux a tendance à augmenter entre le début et la fin du signal, et qu'un troisième point brillant apparaît dans la dernière portion du signal. Ces résultats semblent être conformes avec l'évolution temporelle de l'amplitude du signal (figure 4).

L'existence de trois points brillants est illustrée par la Figure 7, où les 192 derniers ms du signal sont traités de façon cohérente (après préfiltrage sur 32 impulsions et sous-échantillonnage d'un facteur 33).

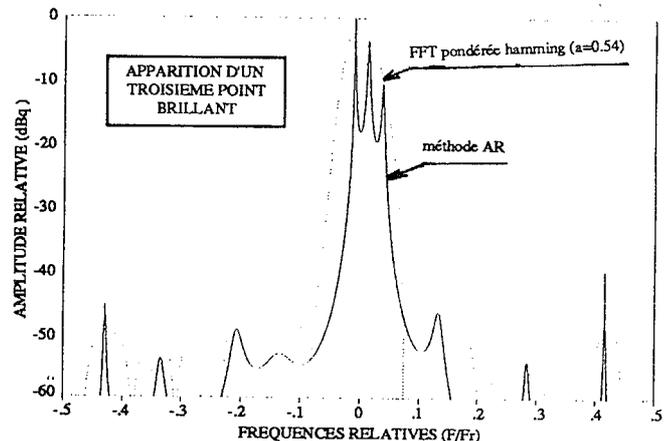


FIGURE 7

### CONCLUSION

Les résultats présentés ont montré l'existence d'une information sur la nature des cibles, accessible par traitement des signaux fournis par un radar conventionnel de poursuite.

Toutefois, compte tenu des objectifs opérationnels visés, le principe des traitements doit être aménagé pour s'accommoder des possibilités de manœuvre de cibles réelles [1], et pour permettre son application à la séparation d'échos multiples [2], les différences d'évolution cinématique des cibles devant être prises en compte de façon spécifique.

### Remerciements

Les auteurs remercient la "Direction des Recherches, Etudes et Techniques" (DRET) de la "Délégation Générale de l'Armement" pour le soutien accordé à cette étude.

### Références

- [1] J. Ender  
1D-ISAR Imaging of Manoeuvring Aircraft  
Agard Conference Proceedings no 459
- [2] F.J. Willems  
Radar Observations of a Formation of Two Fighters  
Agard Conference Proceedings no 459
- [3] C. Calisti and al  
Results of a Radar Imaging Experiment by ISAR  
Technique  
Gretsi 89