



**ANALYSE DE SIGNATURE RADAR SUR CIBLES  
REELLES EN DIVERSITE DE POLARISATION**

**GERARD LAUNAY**

**Université de Rennes I  
Laboratoire Radiocommunications  
Campus de Beaulieu - 35042 RENNES CEDEX**

**RÉSUMÉ**

Cet article donne les résultats d'analyses de signatures observées en diversité de polarisation. Après une description de la méthode et des moyens utilisés, on présente quelques exemples typiques de mesures réalisées sur des avions en vol stabilisé. Ces résultats montrent que les fréquences des raies spectrales liées à la rétrodiffusion de l'onde sur les machines tournantes sont identiques (au premier ordre) quelque soit la polarisation utilisée.

**ABSTRACT**

The purpose of the present paper is to introduce the results of signature analysis observed with polarization diversity. After describing the method and the means involved, we will give some examples made on stable flight planes. These results show that the frequency related to the spectral rays due to the backscattering of the wave on rotating machines are identical (to the 1st order) whatever type of polarization used.

**1 PRINCIPES DE L'ETUDE**

Nous avons pu montrer, au cours d'études préliminaires [1, 2, 3], que l'on pouvait déduire des amplitudes d'échos issus d'un radar de poursuite non cohérent, par une analyse spectrale linéaire, des fréquences caractéristiques des éléments mobiles de la cible poursuivie.

**1-1 Rappel du principe d'analyse : formalisme scalaire**

Soit une onde pulsée émise vers une cible à une fréquence  $f_0$ , elle peut s'écrire sous la forme :

$$s_e(t) = \frac{\tau}{T_R} \cdot \cos(2\pi f_0 t) + \frac{\tau}{T_R} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\pi f_r \tau)}{n\pi f_r \tau} \cdot \left( \cos(2\pi(f_0 + n f_r)t) + \cos(2\pi(f_0 - n f_r)t) \right)$$

expression dans laquelle :

- $f_r$  est la fréquence de récurrence du radar
- $\tau$  est la largeur de l'impulsion émise
- $T_R$  est la périodicité de l'émission

Le signal rétrodiffusé  $s_r(t)$  est modulé en amplitude et retardé, de sorte que :

$$s_r(t) = m(t) \cdot s_e\left(t - \frac{2R(t)}{C}\right)$$

avec  $R(t)$  distance radar/cible  
 $C$  vitesse de la lumière  
 $m(t)$  modulation traduisant les effets liés à la cible

Si on veut tenir compte de l'effet Doppler engendré par la mobilité de la cible, le signal reçu sera sous la forme :

$$s_r(t) = m(t) \cdot \left( \frac{\tau}{T_R} \cdot \cos(2\pi(f_0 + f_d)t) + \frac{\tau}{T_R} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\pi f_r \tau)}{n\pi f_r \tau} \cdot \left( \cos(2\pi(f_0 + f_d + n f_r)t) + \cos(2\pi(f_0 + f_d - n f_r)t) \right) \right)$$

Dans un système non cohérent comme le radar utilisé, le signal est ramené en bande de base par un changement de fréquence établi à partir d'un Oscillateur Local (OL) asservi au signal rétrodiffusé, donc à un signal de fréquence  $f_0 + f_d$ . Le signal moyenne fréquence est alors :

$$s_d(t) = m(t) \cdot \left( \frac{\tau}{T_R} \cdot \cos(2\pi f_i t) + \frac{\tau}{T_R} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\pi f_r \tau)}{n\pi f_r \tau} \cdot \left( \cos(2\pi(f_i + n f_r)t) + \cos(2\pi(f_i - n f_r)t) \right) \right)$$



et le signal vidéo :

$$s_d(t) = m(t) \cdot \frac{\tau}{T_R} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\pi f_r \tau)}{n\pi f_r \tau} \right) \cdot \cos(2\pi n f_r t)$$

Cette méthode élimine donc la possibilité de déterminer le décalage Doppler, mais elle met directement en évidence les modulations liées à la rétrodiffusion de l'onde sur les machines tournantes (pales d'hélices ou de réacteurs).

Le radar de poursuite utilisé est un système à faible pouvoir de résolution. Il s'en suit que le signal observé résulte de la superposition cohérente de toutes les rétrodiffusions élémentaires au niveau de chacun des points brillants essentiels [ 5 ] .

Nous considérons que dans le cas d'un avion isolé, les contributions liées à la rétrodiffusion au niveau des machines tournantes (MT) et celles dues aux contributeurs de la cellule, peuvent être considérées comme non corrélées. Dans ce cas, le théorème de décomposition des cibles de Huynen [ 6 ] s'applique et on peut écrire :

$$m(t) = m_{\text{cellule}}(t) + m_{\text{MT}}(t)$$

où  $m_{\text{cellule}}(t)$  représente la modulation due à la variation de l'attitude de la cible alors que  $m_{\text{MT}}(t)$  est liée à la rotation des machines tournantes.

Dans le type de radar que nous utilisons, le Contrôle Automatique de Gain (CAG) intervient comme un filtrage passe-haut et altère la mesure de  $m_{\text{cellule}}(t)$ . Nous ne nous intéressons ici qu'à la mesure de  $m_{\text{MT}}(t)$  [ 1, 2, 3, 4 ] .

### 1-2 Implications de la polarimétrie : formalisme vectoriel

La polarimétrie semble jouer un rôle important tant en ce qui concerne la détection, que pour la discrimination et la classification des cibles. Il convient donc de contrôler que la dépolarisation du signal ne détruit pas l'information liée à la signature des machines tournantes.

Une cible peut être complètement définie par sa matrice de rétrodiffusion (backscattering matrix), qui s'écrit :

$$S = \begin{pmatrix} S_{aa} & S_{ab} \\ S_{ba} & S_{bb} \end{pmatrix}$$

expression dans laquelle les termes  $S_{ij}$  sont complexes et dont les indices a et b représentent deux polarisations orthogonales qui forment la base de polarisation dans le plan d'onde. Les termes  $S_{ii}$  et  $S_{ij}$  sont respectivement caractéristiques du signal réfléchi en polarisation directe (copolar) et croisée (crosspolar).

Le terme  $m(t)$  décrivant le comportement de la cible peut prendre 4 valeurs (notation  $m_{ij}$ ). Ces valeurs sont liées aux polarisations utilisées à l'émission et à la réception. Dans le cas idéal où les antennes peuvent être considérées comme parfaites (polarisations linéaires ou circulaires), on peut écrire [ 7 ] :

$$m_{ij}(t) = K \cdot |S_{ij}| \quad i, j = a \text{ ou } b$$

où K est un coefficient de proportionnalité déduit de l'équation radar.  $|S_{ij}|$  est noté habituellement  $\sigma^{1/2}$

Pour décrire totalement le comportement de la cible, il faut connaître simultanément les quatre coefficients de la matrice ce qui nécessite une émission simultanée sur une même fréquence porteuse de deux ondes à polarisations croisées et la réception sélective des quatre signaux correspondants. Dans le cas d'un radar monostatique, l'antenne est symétrique en émission et en réception, le théorème de réciprocité implique que la matrice S soit symétrique :  $S_{ab} = S_{ba}$ , ce qui réduit à trois le nombre des voies de réception à traiter.

Dans le cadre qui nous intéresse, nous voulons savoir si la dépolarisation de l'onde modifie le contenu spectral de la signature machine tournante : il n'est donc pas nécessaire de traiter le problème dans son ensemble.

### 1-3 Moyens mis en oeuvre

Nous avons mis en place une chaîne de mesure fonctionnant en diversité de polarisation (horizontale, verticale, circulaire droite ou gauche), constituée de deux radars de poursuite du type COTAL, identiques à polarisation réglable parmi le choix précité, fonctionnant :

- l'un en émission-réception à polarisation horizontale
- l'autre qui a été asservi en position et en fréquence, en réception seule à polarisation verticale.

Cette chaîne, complétée par un système numérique d'acquisition et de traitement des données, nous donne accès au module de trois des quatre coefficients de la matrice de rétrodiffusion S.

Les mesures sont effectuées à la Station Expérimentale de Monterfil (30 km Ouest de Rennes), sur des avions de ligne volant dans des conditions normales (vitesse stabilisée, trajectoire régulière, altitude constante).

Les vidéos sélectionnées appelées respectivement "*vidéo maître*" (co-polarisation, mesure de  $\sigma_{vv}$ ) et "*vidéo esclave*" (cross-polarisation, mesure de  $\sigma_{hv} = \sigma_{vh}$ ) sont acquises simultanément à l'instant d'arrivée du top de télémétrie généré par l'asservissement de poursuite radar, puis enregistrées après multiplexage sur ordinateur en même temps que les informations de télémétrie (heure, élévation, gisement, distance). A la fin de la mesure, ces informations sont triées et séparées en trois fichiers :

- un fichier de trajectographie
- un fichier "*maitre*"
- un fichier "*esclave*"

Dans cet article, le traitement appliqué aux fichiers vidéo consiste en :

- un filtrage fréquentiel destiné à éliminer les raies spectrales liées à la technique de balayage cône utilisé pour la poursuite radar et aux raies très basse fréquence dues aux fluctuations de la SER cellule.
- une FFT avec présentation des résultats en "3D" ou en affichage spectrographique "2D".

## 2 VALIDATION DES MESURES

Pour valider ces résultats, nous avons vérifié que les senseurs sont identiques et linéaires et que l'action des polariseurs engendre une distorsion de polarisation faible, en les soumettant simultanément à un faisceau continu envoyé à partir d'un cornet.

Cette mesure a permis d'évaluer le défaut de pureté des polariseurs à 20 dB (rapport entre les signaux reçus) dans deux polarisations croisées pour une même polarisation émise), ce qui veut dire que, pour des écarts entre les vidéos "maître" et "esclave" supérieurs à 20 dB, nous ne pourrions pas affirmer qu'ils sont dûs à une rétrodiffusion en cross-polar ou à une dépolarisation de l'onde dans le système d'émission-réception.

## 3 PRESENTATION DES RESULTATS

Les fichiers de valeurs enregistrés par une chaîne d'acquisition de données sur un ordinateur PC sont triés (décompactage), puis traités par divers logiciels pour obtenir le spectre des signaux "maître" & "esclave", ainsi que la trajectographie de la cible.

Nous présentons ci-dessous des résultats obtenus par cette technique montrant la présence de raies "machines tournantes" dans les deux vidéos. Nous donnons la trajectographie du passage et le spectre du signal auquel on applique le filtrage numérique défini précédemment.

### 3-1 Analyse d'une propulsion à hélice

Il s'agit d'un vol enregistré le 12 juin 1991 dont la trajectographie est présentée en projection au sol (figure 1); altitude moyenne : 5 kms.

Les spectres (figures 2 et 3) montrent l'existence, sur les voies copolar et crosspolar, de raies spectrales de mêmes fréquences et d'amplitudes relatives sensiblement égales. On peut remarquer sur cette image la présence de plusieurs groupes de raies :

- deux raies harmoniques situées à 86 et 172 Hz attribuées aux moteurs ( $f = \text{RPM} \cdot \text{nb de pales}/60$ ).
- quatre groupes de raies symétriques les uns par rapport aux autres avec des axes de symétrie situés à 86, 43 et 129 Hz.

La cohérence entre les mesures "maître" et "esclave" est observable sur une représentation 2D (figure 4).

### 3-2 Analyse d'une propulsion à réaction

Il s'agit d'un vol enregistré le 30 octobre 1990 dont la trajectographie est présentée en projection au sol (figure 5) ; altitude moyenne : > 10 kms.

L'examen des FFT en 3D montre l'existence d'une raie fluctuante entre 100 et 130 Hz lorsque l'avion est vu de l'avant (figure 6) et entre 80 et 120 Hz lorsqu'il s'éloigne (figure 7), ceci tant sur le signal vidéo maître que sur l'esclave. Le calcul étant effectué globalement, la présence de raies de forte amplitude, pendant le passage au zénith, masque les raies d'amplitude plus faibles liées à la rotation des réacteurs.

La représentation 2D (figure 8) montre l'ensemble des spectres sur la durée totale du passage enregistré.

## 4 CONCLUSION

Nous avons pu vérifier que la recherche d'éléments de signature liée à la rétrodiffusion de l'onde sur les machines tournantes semble peu affectée par le mode de polarisation utilisé à la réception. Il n'en est pas de même en ce qui concerne les variations lentes de l'enveloppe de la modulation de l'écho qui, liées à la rétrodiffusion de l'onde sur la cellule, sont affectées par ce choix.

Ce travail a été effectué dans le cadre d'une convention entre le Laboratoire Radiocommunications et le Centre d' Electronique de l'Armement (CELAR) de Bruz (Ille et Vilaine).

## BIBLIOGRAPHIE

- 1 J. MEVEL, G. CHASSAY, G. LAUNAY  
*"Premiers résultats expérimentaux concernant les signatures radar de cible"* . Colloque GRETSI, Nice, 1977, 9. 75-1 à 75-7.
- 2 G. CHASSAY, G. LAUNAY, J. MEVEL, J. SAILLARD  
*"Contribution à l'étude de la reconnaissance des formes au radar"*. Colloque GRETSI, Nice, 1979, p. 28-1 à 28-7
- 3 G. CHASSAY, G. LAUNAY, J. MEVEL, J. SAILLARD  
*"Méthode d'extraction de données relatives à des modèles de points brillants à partir de l'analyse de la puissance diffractée"*. Colloque GRETSI, Nice, 1981, p. 689-691.
- 4 J. MEVEL, G. LAUNAY  
*"Signatures d'avions à l'aide du radar monostatique"* . Annales de Télécommunications, Tome 36, n° 5-6, 1981.
- 5 D. GUILI  
*"Polarisation diversity in radars"*. Proceedings of the IEEE, vol. 74, n° 2, february 1986.
- 6 J.R. HUYNEN  
*"Phenomenological theory of radar targets"*. Ph. D. Dissertation, Rotterdam, The Netherlands, Drukkerij Bronder-Offset, N.V., 1970.
- 7 M. WHITT, F. ULABY, P. POLATIN, V. LIEPA  
*"A general polarimetric radar calibration technique"*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 39,0 n° 1, january 1991.