

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75



SIGNATURE DE CIBLES AERIENNES

J. MEVEL

Laboratoire de Radioélectricité - FACULTE DES SCIENCES - 35031 RENNES

RESUME

Dans cette étude nous examinons les possibilités de reconnaissance des cibles aériennes isolées à l'aide de radars monostatiques classiques. Après avoir rappelé qu'il existe deux problèmes différents: l'un reconstitution de la forme géométrique, l'autre signature des cibles, nous examinons les possibilités de résolution de chacun d'eux. Nous mettons en évidence l'intérêt de corrélérer les discriminants à l'attitude des cibles et la nécessité de tenir compte des déformations périodiques de ces dernières. Deux solutions approchées du problème de la reconstitution des formes publiées dans la littérature sont rappelées. On montre quelles resteront probablement inapplicables en pratique.

Nous indiquons enfin les principes de résolution que nous proposons : ils sont orientés vers le problème des signatures en utilisant, pour augmenter le nombre des discriminants, l'expérimentation multifréquentielle. Nous donnons enfin quelques détails sur les expériences en cours à la Faculté des Sciences de Rennes.

SUMMARY

In this paper we examine the capabilities of monostatic radar to solve the problem of isolated aerial target reconnaissance. We point out two different aspects of this question : one is target imaging techniques, the other are target signature analysis. We examine possible answers for there two questions. We show that it is fundamental to correlate discriminants with target attitude and to pay attention to the periodic deformation of surfaces. Two approximate techniques for target imaging described in the literature are reminded. We show that probably they will stay inapplicable in practice.

At last we describe the solution technique that we preconize : they are aimed toward signature analysis by using multifrequency radars to multiply number and power of discriminants. Finally we give some details about our experimental work at Faculté des Sciences de Rennes.



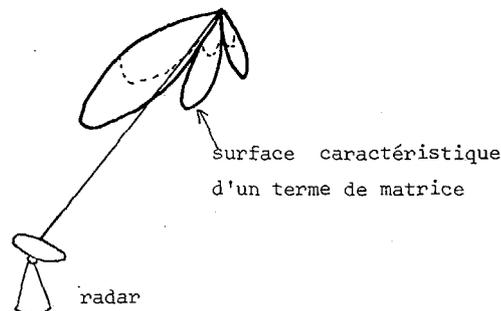
INTRODUCTION

Dans cette étude nous examinons les possibilités de reconnaissance de la nature d'objets aériens, isolés de toutes sources de clutter, à l'aide du radar monostatique classique, c'est-à-dire à bande relative étroite. Deux types de traitements (1) peuvent être envisagés : l'un analytique, par décomposition fine de la cible, l'autre synthétique par utilisation d'une cellule de résolution plus grande que les dimensions de la cible. La présente étude se limite à ce dernier cas. Nous distinguons, dans ce qui suit, la *reconnaissance* au sens strict ou reconstitution d'une certaine image de la cible et la *signature* par détermination de paramètres caractéristiques.

L'objet aérien, peut selon les cas être considéré comme rigide ou comme déformable.

S'il est rigide, on peut lui associer un trièdre repère ayant par exemple pour sommet le centre de gravité et invariablement lié à l'objet. Par rapport à ce trièdre repère, les différents termes constituant la matrice de rétrodiffusion définie pour une fréquence porteuse donnée, peuvent être représentés sous forme de surfaces fixes. Rappelons que l'on peut considérer 7 surfaces, 4 représentant les amplitudes pour deux polarisations orthogonales, et 3 représentant les déphasages relatifs correspondants, les mesures absolues de phase paraissant impossibles par suite de leur trop grande sensibilité à la distance. Les observables pour le radar classique sont donc à chaque instant les interactions des 7 surfaces ci-dessus par le rayon vecteur joignant le sommet du trièdre repère au centre de l'aérien radar.

Au cours du temps, l'objet aérien se déplace et présente en général une rotation apparente par rapport au radar. Les seules exceptions concernent la trajectoire rectiligne, directement pointée sur le radar et la trajectoire circulaire centrée sur le radar ou ayant pour axe la verticale de ce dernier. Il en résulte qu'au cours d'une observation prolongée, le radar observe des réalisations de fonctions aléatoires, représentées géométriquement par l'intersection de la nappe cônica engendrée par le rayon vecteur radar-cible et les surfaces caractéristiques des termes correspondants de la matrice de rétrodiffusion.



Si le corps est déformable, la matrice de rétrodiffusion devient elle-même une fonction du temps. Les déformations du corps peuvent être :

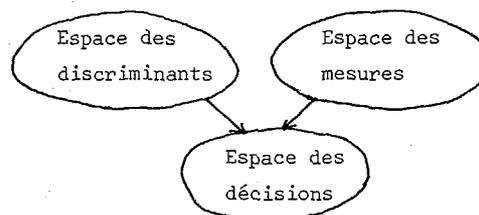
- Pour un corps unique, des modifications aléatoires de forme, par exemple déformation des ailes ou de la structure en fonction des efforts, pour les avions, ou des modifications périodiques quasi-certaines : rotation des pales d'hélices des avions ou des hélicoptères, des ailettes de turbines, ... etc.

- Pour un corps multiple, par exemple deux avions en formation serrée, ce sont les déplacements relatifs. Rappelons que dans ce second cas, l'ensemble des corps considérés doit occuper un volume inférieur à la cellule de résolution radar.

Les observables sont, dans le cas du corps déformable, constitués par une réalisation aléatoire d'une matrice dont les termes sont eux-mêmes aléatoires ce qui complique apparemment le problème.

I - POSSIBILITE DE SOLUTION DU PROBLEME DES SIGNATURES

- Du point de vue *conceptuel*, le problème des signatures conduit à créer trois espaces multidimensionnels (2) :



Dans le premier, on classe les éléments caractéristiques (discriminants) des objets supposés connus que l'on peut rencontrer, dans le deuxième on dispose les



grandeurs mesurées, l'ensemble de ces données comparées dans le troisième fournit, à l'aide de règles logiques, la décision sur la nature de l'objet observé. Les dimensions des espaces sont caractéristiques du nombre des discriminants choisis.

- Du point de vue *pratique*, on est conduit, dans une première phase, à classer les discriminants que l'on utilise effectivement et dont le nombre et la nature dépendent des possibilités du radar. Nous avons dans l'introduction indiqué la nature des discriminants pour une fréquence donnée. Une possibilité supplémentaire réside dans l'emploi de radars multifréquentiels. Dans une seconde phase, on définit la méthode de traitement des données. La plus simple consiste dans l'analyse statistique directe des réalisations des fonctions aléatoires observées, c'est ce que nous avons effectué lors de nos premiers essais (1). On peut, parallèlement aux méthodes statistiques qui ont le défaut d'éliminer toute information sur l'ordre d'arrivée des événements, (2) utiliser des procédés temporels.

L'examen plus précis des phénomènes nous a montré que cette étude directe n'est aucunement optimale en ce qui concerne les signatures, mais qu'il faut tenir compte de l'attitude relative de la cible et du radar.

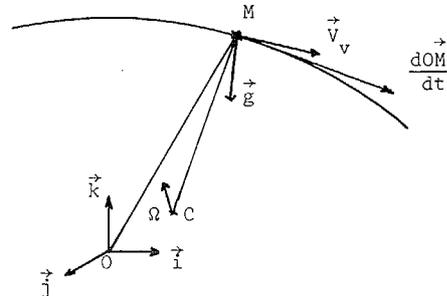
Nous avons examiné les deux cas suivants :

- Avion ou hélicoptère. La reconstitution d'attitude est relativement simple, il faut disposer d'un radar à poursuite automatique qui détermine à chaque instant la trajectoire $\vec{OM}(t)$ et mesure la vitesse absolue $d(\vec{OM})/dt$ de l'appareil par rapport à un trièdre lié au sol. Un calculateur détermine le centre de courbure C de la trajectoire et la vitesse instantanée de rotation $\vec{\Omega}$ de l'appareil d'où l'on déduit l'accélération centrifuge. En admettant par hypothèse que l'avion possède pour verticale apparente la composition de l'accélération centrifuge et de la pesanteur \vec{g} , on en déduit l'inclinaison du plan alaire sur l'horizontale.

Pour connaître la direction de l'axe de l'avion, il faut remarquer que la vitesse $d\vec{OM}/dt$ est la résultante de la vitesse propre \vec{V} de l'avion mesurée par rapport à l'air ambiant et de la vitesse \vec{V}_v du vent à l'altitude de vol, quantité qu'on peut déduire d'un sondage aérologique.

Ces éléments étant déterminés, l'attitude de l'avion par rapport au radar est connue et le calcul permet de parvenir à la vitesse apparente de rota-

tion. Des programmes ont été établis et sont en cours d'évaluation.



- Engin aérodynamique ou balistique. Ce cas est très délicat, parce qu'il n'est pas possible de déterminer l'attitude. Par contre, les périodicités observées sur les enregistrements permettent de mettre en évidence les rotations propres éventuelles. De plus, ces engins étant en général de dimensions médiocres, les surfaces caractéristiques sont plus simples que celles des avions ou des hélicoptères, surtout si l'on utilise, comme c'est le cas en général, un radar de poursuite à ondes relativement longues.

- Dans les deux cas, on peut donc affiner les discriminants statistiques en les étudiant en fonction de l'attitude, ou encore déterminer l'écart des lobes des sections efficaces de rétrodiffusion d'où l'on peut, comme on l'a montré (1), remonter à une estimation des dimensions transversales de la cible.

II - POSSIBILITES DE SOLUTION DU PROBLEME DE RECONNAISSANCE DES FORMES

Plusieurs difficultés s'opposent à une solution correcte du problème :

- On ne sait résoudre rigoureusement le problème de diffraction que pour très peu de formes d'objets. Toutefois on dispose de méthodes de calcul approchées qui donnent des résultats très corrects quand on les compare aux mesures expérimentales.
- On ne connaît pas en général la nature des matériaux constituant la cible et on cherche seulement à synthétiser un conducteur équivalent
- L'éventail des attitudes sous lesquelles on peut observer la cible au cours d'un passage est très réduit.

Les principales méthodes proposées actuellement sont :

- La méthode de Lewis (3) basée sur une relation



déduite par Bojarski (4) de la formule de Kirchoff et qui est donc valable pour les objets dont les dimensions sont grandes par rapport à la longueur d'onde. Dans ces conditions, en supposant le corps parfaitement conducteur, Bojarski montre que des mesures du champ diffracté à l'infini permettent de déterminer une fonction $\rho(\vec{p})$, \vec{p} étant un vecteur dont la direction correspond à l'aspect sous lequel on examine la cible et dont le module est $|\vec{p}| = 2\omega/c$, ω étant la pulsation et c la célérité des ondes électromagnétiques. Il montre ensuite que les fonctions $\Gamma(\vec{p}) = 2\sqrt{\pi} \frac{\rho(\vec{p}) + \rho^*(-\vec{p})}{p^2}$ et la fonction caractéristique de la cible $\gamma(x)$ définie comme étant égale à 1, si le point x est intérieur à la cible, et égale à 0 si le point est extérieur, forment une paire de transformées de Fourier. Une mesure du champ rétrodiffusé dans tout l'espace des \vec{p} , c'est-à-dire sous tous les aspects et à toutes les fréquences, permet donc une reconstitution exacte de la cible.

Malgré les différentes tentatives effectuées pour déduire des conclusions valables d'une connaissance limitée de $\rho(\vec{p})$ (4,5), il semble que la méthode exige pour être appliquée beaucoup plus d'informations qu'il n'est possible d'en fournir.

L'utilisation d'une forme particulière de la réponse impulsionnelle : la réponse à une rampe d'amplitude (6) dont on peut obtenir une synthèse approchée par mesures multifréquentielles à l'aide de radars classiques. La réponse $F_r(t)$ à la rampe d'amplitude peut être considérée comme étant l'intégrale seconde de la réponse impulsionnelle $F_1(t)$. Elle est reliée à la réponse fréquentielle $G(j\omega)$ à grande distance par l'intégrale de Fourier

$$F_r(t) = \frac{1}{2\pi c} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G(j\omega)}{(j\omega)^2} e^{j\omega t} d\omega$$

Les études de l'Université d'Ohio (7) ont montré qu'il est possible de déterminer des réponses en rampe correctes par mesure sur 10 fréquences harmoniques, à condition que le domaine considéré comprenne la zone de résonance de la cible, ce qui limite pratiquement l'application de la méthode aux objets de petite dimension, et d'en déduire des surfaces limites approximatives valables pour la fonction caractéristique $\gamma(\vec{x})$ de Lewis. De plus, il est possible de perfectionner le résultat en y adjoignant les données

déduites des observations radar à impulsions courtes (8). Trois observations effectuées selon des directions orthogonales permettent une reconstitution de la forme géométrique de la cible qui est très correcte dans de nombreux cas.

Les difficultés provenant du peu d'attitudes sous lesquelles on voit la cible au cours d'un passage ne peuvent que nous rendre très pessimiste en ce qui concerne la solution pratique du problème.

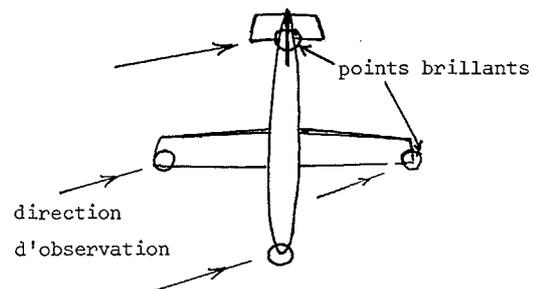
III - DEVELOPPEMENTS EN COURS A LA FACULTE DE RENNES

Les études sont axées vers la résolution du problème des signatures, mais en le dépassant, pour y introduire des notions déductibles des procédés multifréquentiels de reconnaissance des formes. De sévères restrictions ont été imposées par les limitations des matériels radar dont nous disposons.

Rappelons que notre installation (1) comprend essentiellement :

- un radar de trajectographie avec calculateur associé
- des radars de mesure sur 432, 1300 et 3000 MHz, auxquels seront adjoints plus tard des dispositifs en 5600 et 9000 MHz.

Ces radars, à l'exception du 432 MHz sont incohérents, ce qui nous empêche de reconstituer la réponse en rampe d'amplitude ainsi que d'exploiter la signature de phase (9). Toutefois, l'approximation optique généralement acceptable dans le cas des avions par suite de la grande dimension des éléments mesurés en longueur d'onde, permet de représenter la cible par les contributions de centres réfléchissants ou "points brillants" en petit nombre d'ailleurs.





Selon la nature des points brillants, la section efficace élémentaire est une fonction différente de la longueur d'onde radar allant de λ^{-2} pour un plan à λ^2 pour le sommet d'un cône (10). Cette section efficace dépend de plus de la polarisation.

En conséquence, une mesure des sections efficaces pour les diverses polarisations, autrement dit des termes d'amplitudes a_{ij} de la matrice de diffraction, permet de déduire, malgré la méconnaissance des termes de phase, de nombreuses données discriminantes.

La mise au point des dispositifs de mesure est en cours, deux méthodes différentes sont employées simultanément :

1) Une exploitation en temps différé conduisant à une analyse précise des données.

Elle nécessite l'enregistrement :

- des amplitudes d'échos fournis par le radar pour les diverses polarisations de travail. Après multiplexage et échantillonnage ces données sont inscrites sur bandes magnétiques digitales.

- des indications de trajectographie actuellement obtenues sur les graphiques des tables traçantes. Il est prévu de les insérer plus tard sur bandes magnétiques.

- des données complémentaires diverses, données météorologiques, rapport signal/bruit des échos, fluctuations d'écartométrie, ces derniers éléments permettant de juger la qualité des enregistrements de base.

L'ensemble de ces données sera ensuite traité sur ordinateur pour en déduire les valeurs statistiques moyennes en fonction de l'attitude cible/radar qui constitue le seul élément ayant une signification physique. Dans un premier temps on s'attachera aux valeurs moyennes et aux valeurs quadratiques moyennes, puis dans un second, on étudiera les fonctions de corrélation, le spectre, etc ...

2) Une exploitation en temps réel des données brutes, sans restitution des attitudes. Deux instruments sont en fin de mise au point dans ce but :

- un corrélateur en temps réel semi-analogique
- un analyseur de spectre à compression de temps

Dès les premiers essais (1), on avait en effet constaté tout l'intérêt de ces déterminations en temps réel du point de vue exploitation pratique des radars car ils permettent par exemple la mise en évidence précoce des évolutions des cibles traduite par l'évolution brusque de la composition spectrale, ou encore l'analyse des cibles multiples, par exemple avions volant en groupe qui se traduit par l'apparition d'harmoniques 2 de la fréquence du balayage conique.

Dans ce paragraphe, nous avons traité l'objet comme rigide. Les modulations d'écho dues aux déformations se superposent à celles résultant des variations d'attitude mais les variations rapides (hélices d'avions, pales de turbines) resteront sans doute inobservables à cause de la nature échantillonnée des informations. Pour les extraire il faudrait disposer d'un illuminateur continu ou au minimum à impulsions très longues.

CONCLUSION

- Dans l'état actuel, la résolution du problème de reconnaissance des formes au sens strict paraît exclue dans les conditions indiquées ci-dessus par suite du trop petit nombre d'attitudes observables au cours d'un passage. En tous cas, on ne pourra jamais espérer atteindre qu'un conducteur équivalent.
- Le problème des signatures paraît relativement simple à résoudre. Les méthodes sont à déterminer d'après le temps dont on dispose pour obtenir la solution. La confiance attribuée à la solution obtenue sera d'autant meilleure que le temps d'observation sera plus long et le nombre de discriminants plus élevé.



B I B L I O G R A P H I E

- (1) Extraction d'informations sur la nature des cibles à partir de l'écho radar. J. MEVEL. Comptes-Rendus du 4^e Colloque GRETSI, Nice 7 au 12 mai 1973, p. 821-838.
- (2) An application of equivalence class techniques to radar signature analysis. GRUVER. Oklahoma State University. Phys. Doct. Thesis, 1968.
- (3) Physical optics inverse diffraction. LEWIS. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. AP 17 n° 3, may 1969, p. 308-314.
- (4) Three dimensional electromagnetic short pulse inverse scattering. BOJARSKI. Syracuse University Research Report, Syracuse, N.Y., febr. 1967.
- (5) Inverse scattering investigation. WESTON, BOWMAN et ERGUN. University of Michigan Radiation Laboratory Report, n° 7644-I-F, may 1966. Inverse scattering investigation. WESTON. University of Michigan, report n° 8579-1Q, april 1967.
- (6) Transient and impulse response approximation. KENNAUGH et MOFFATT. Proc. IEEE, vol. 53, aug. 1965, p. 893-901. Final report research into the scattering of electromagnetic energy from highly conducting bodies. KENNAUGH, MOFFATT et SCHAFFER. Ohio State University, may 1967.
- (7) The inverse scattering and target identification problem. BREEDING et KSIENSKI. Ohio State University technical report 2768-4, nov. 1970. Target imaging from multiple frequency radar returns. YOUNG. Ohio State University. Technical report 2768-6, june 1971. A radar target data processing and identification systems. BREEDING. Ohio State University Technical report 2768-8, june 1972. Measurement and analysis of spectral signatures. YOUNG. Ohio State University, nov. 1973.
- (8) Measurement and analysis of spectral signatures. Ohio State University, febr. 1971.
- (9) Phase, phase signatures and simple inverse properties of backscattered fields of thin rods. MACK. Air Force Cambridge Research Laboratories. Hanscom field. Bedford, Massachusetts.
- (10) Methods of radar cross section analysis. CRISPIN & SIEGEL. Academic Press, 1968. Radar Cross Section Handbook. RUCK, BARRICK, STUART, KRICHBAUM. Plenum Press, 1970. Radar design principles. NATHANSON, Mc Graw-Hill, 1969