



APPLICATION DE LA POLARIMETRIE A L'IMAGERIE
ELECTROMAGNETIQUE HAUTE RESOLUTION

Mrs E.POTTIER J.SAILLARD

Laboratoire SYSTEMES et SIGNAUX HAUTES FREQUENCES
IRESTE - La Chantreterie CP3003 - 44087 NANTES Cedex03 - Tel (33) 40.68.30.63

Actuellement l'imagerie radar est utilisée pour effectuer l'analyse de la signature de cibles radar. Le problème inverse de la diffraction électromagnétique est alors résolu en retrouvant à partir de la connaissance du champ complexe rétrodiffusé, les coordonnées géométriques et les propriétés physiques des contributeurs élémentaires. Par calculs, se construit une Image Electromagnétique Haute Résolution de la cible dans le plan d'observation. La Polarimétrie, c'est à dire l'étude de la polarisation (sous son aspect vectoriel) des ondes émises et reçues, est introduite dans le domaine de l'imagerie radar, afin d'améliorer la discrimination de cibles radar.

A partir d'une cible complexe, nous montrons que l'introduction de la Polarimétrie dans l'imagerie radar est un apport non négligeable dans les domaines de la discrimination, de la reconnaissance et de la classification.

Today, radar imaging is used in target rcs signatures analysis. The electromagnetic diffracting inverse problem is resolved by recovering from the knowledge of the backscattered complex field, the geometrical coordinates and physical properties of scatterers. By calculus, we construct a High Resolution Electromagnetic Radar Image of the target in the observation plane. The Polarimetry concept, that is to say the study of the polarization, under its vectorial aspect, of the backscattered and incident waves, is introduced in radar imaging to improve target discrimination. From a complex radar target example, we show that the introduction of the Polarimetry concept in radar imaging gives an improvement in the classical problems of discrimination and classification.

1 INTRODUCTION.

La contribution de la Polarimétrie dans la discrimination de cibles radar est une étude actuellement menée par l'IRESTE. L'objectif de cette étude est d'introduire le concept de la Polarimétrie dans l'élaboration d'"Images Electromagnétiques Haute Résolution" en vue d'améliorer la discrimination et la classification de cibles radar.

Dans une première partie nous rappelons les principes de base de l'holographie radar ainsi que de la construction d'Images Electromagnétiques Haute Résolution. Puis nous introduisons dans la construction d'images radar le concept de la Polarimétrie en faisant ressortir les améliorations ainsi obtenues. Dans une troisième partie nous pourrions, grâce aux propriétés de la Polarimétrie, obtenir une image radar optimale pour la discrimination d'une cible radar.

2 INTRODUCTION A L'HOLOGRAPHIE RADAR [1].

L'holographie radar est un procédé permettant de réaliser une "Image Electromagnétique Haute Résolution" d'une cible radar complexe, à partir des valeurs du coefficient de rétrodiffusion de la cible, relevé en fonction de deux paramètres: la fréquence (f) et la position angulaire(θ) du radar par rapport au centre de phase de la cible. Le coefficient de rétrodiffusion représente le rapport du champ de l'onde réfléchi et de l'onde incidente. Ce coefficient est complexe et traduit un affaiblissement et un déphasage.

De plus, le coefficient de rétrodiffusion dépend des polarisations d'émission et de réception.

"L'Image Electromagnétique Haute Résolution" est obtenue par sommation des réponses impulsionnelles représentant les fonctions temporelles de l'écho renvoyé par la cible. L'image radar obtenue représente la projection des points brillants dans le plan d'observation, ce qui permet de localiser parfaitement les positions des centres de diffraction.

3 FORMULATION MATHÉMATIQUE [1].

D'une manière générale, on considère qu'une cible complexe est constituée d'un ensemble de N points brillants indépendants et isotropes pour toutes les fréquences. L'écho reçu par le radar s'exprime par:

$$S(\vec{k}) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot e^{-z_j \vec{k} \cdot \vec{x}_i} \quad (1)$$

où a_i représente le coefficient de rétrodiffusion du $i^{\text{ème}}$ point, et \vec{x}_i son vecteur position dans le repère cible, \vec{k} étant le vecteur d'onde.

La relation (1) peut s'exprimer sous la forme:

$$S(\vec{k}) = \iiint \left[\sum_{i=1}^N a_i \cdot \delta(\vec{x} - \vec{x}_i) \right] e^{-z_j \vec{k} \cdot \vec{x}} d\vec{x} \quad (2)$$

où $\delta(\vec{x})$ est le peigne de Dirac Tridimensionnel
Si l'on pose:



$$I(\vec{\lambda}) = \sum_{i=1}^N a_i \delta(\vec{\lambda} - \vec{\lambda}_i) \quad (3)$$

où $I(\vec{\lambda})$ représente l'image tridimensionnelle de la cible, alors l'expression (2) s'exprime comme étant égale à la Transformée de Fourier Tridimensionnelle Inverse de l'image radar d'où:

$$I(\vec{\lambda}) = \iiint S(\vec{k}) \cdot e^{zjk\vec{\lambda}} d\vec{k} \quad (4)$$

Si l'on restreint l'analyse à deux dimensions (f, θ) , on obtient la formulation mathématique de l'Image Electromagnétique Haute Résolution suivante:

$$I(\vec{\lambda}) = 4 \left[\frac{\pi}{c} \right]^2 \iint_{F \ominus} f S(f, \theta) e^{2j\pi f \left(\frac{z}{c} (x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta)) \right)} df d\theta \quad (5)$$

4 REPRESENTATION GEOMETRIQUE [1].

La figure n°1 montre la représentation géométrique d'une image radar. Le référentiel (O', X_r, Y_r, Z_r) est lié au radar, tandis que le référentiel (O, X, Y, Z) est lié à la cible. L'origine 0 correspond au centre de phase de la cible. Après construction, on obtient l'image radar dont l'origine de phase de la cible est au centre de l'image, tandis que l'onde radar incidente provient de la gauche.

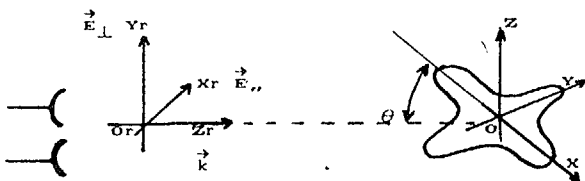


Figure n°1: Représentation Géométrique d'une mesure Radar.

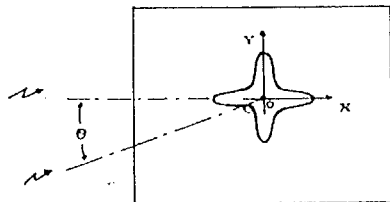


Figure n°2: Image Radar obtenue

5 LIMITES DE L'HOLOGRAPHIE TRADITIONNELLE.

Une Image Electromagnétique Haute Résolution telle qu'elle a été définie, est obtenue à partir de la connaissance du coefficient de rétrodiffusion. Ce coefficient est fonction de la polarisation du couple émission réception.

Or, il est évident qu'un simple nombre scalaire n'est pas adéquat pour obtenir une image radar performante dans la discrimination de cibles.

Afin de montrer l'insuffisance d'information contenue dans le coefficient de rétrodiffusion, on considère une cible radar complexe décomposable en trois cibles canoniques et indépendantes (ie sans interactions), à savoir deux dipôles et une croix. Les dipôles ont une orientation respective de +30° et -45° par rapport à l'axe de visée du radar. La croix, quant à elle, est orientée à +45°. Les deux dipôles ont respectivement, dans le repère cible, les positions $(0,0,0)$ et $(1,1,0)$, tandis que la croix est située en $(0,5,0,5,0)$.

L'image radar correspondante, obtenue avec une polarisation horizontale à l'émission et à la réception est représentée figure n°3.

On remarque sur cette image la présence de deux zones brillantes, qui correspondent en fait aux deux dipôles, et aucune trace en ce qui concerne la croix. Ceci nous permet de

conclure qu'une image radar construite à partir de la connaissance d'un coefficient de rétrodiffusion n'est pas optimale pour la discrimination de la cible.



Figure n°3: Image Radar de la Cible Complexe.

6 LA POLARIMETRIE DANS L'IMAGE RADAR [2].

La description complète d'une cible, en matière de rétrodiffusion, est obtenue en fonction de sa "Matrice de Rétrodiffusion" qui relie la polarisation de l'onde rétrodiffusée à celle de l'onde émise. Si l'onde incidente est exprimée dans une base orthogonale de vecteurs de polarisation, à savoir horizontale et verticale dans le cas le plus simple, alors l'onde rétrodiffusée par la cible s'exprime en fonction de l'onde incidente avec:

$$\vec{E}_s = [S] \cdot \vec{E}_i \text{ soit: } \begin{bmatrix} E_s^h \\ E_s^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i^h \\ E_i^v \end{bmatrix} \quad (6)$$

La matrice de rétrodiffusion $[S]$ est une caractéristique de la cible. Dans le cas monostatique, où les antennes d'émission et de réception sont spatialement confondues, alors la matrice de rétrodiffusion est symétrique. A partir de la connaissance des matrices de rétrodiffusion, il va être possible de construire quatre images, correspondant aux quatre coefficients de rétrodiffusion S_{ij} , qui contiendront toute l'information relative à la cible, permettant ainsi une meilleure discrimination.

Les matrices de rétrodiffusion associées aux cibles de l'exemple précédent, sont respectivement pour les deux dipôles et la croix:

$$\begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \cos(\theta)\sin(\theta) \\ \cos(\theta)\sin(\theta) & \sin^2(\theta) \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \sin(2\theta) \\ \sin(2\theta) & -\cos(2\theta) \end{bmatrix}$$

où θ est l'angle d'orientation de ces cibles par rapport à l'axe de visée du radar.

A partir des matrices de rétrodiffusion globale, obtenues suivant f et θ avec:

$$[S(f, \theta)] = \sum_{i=1}^3 [S(f, \theta)]_i \cdot e^{-zjk\vec{\lambda}} \quad (7)$$

on construit l'"Image Electromagnétique Haute Résolution" correspondant à chaque coefficient de rétrodiffusion S_{hh}, S_{hv}, S_{vh} et S_{vv} .

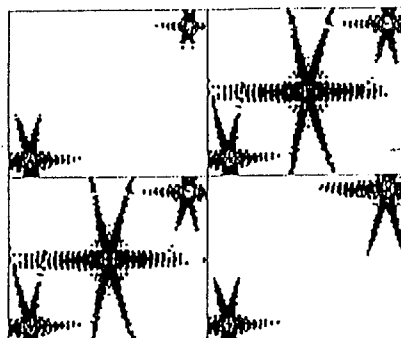


Figure n°4: Image Radar de la Cible Complexe.

Les deux zones brillantes contenues dans les images HH et VV correspondent aux deux dipôles. Le dipôle situé en (1,1,0) et orienté à -45° diffuse autant d'énergie dans les deux canaux co-polarisés, par contre le dipôle placé en (0,0,0) et orienté à +30° diffuse plus d'énergie dans le cas d'une émission horizontale.

La croix, correspondant à la troisième zone brillante, est retrouvée uniquement dans les images cross-polarisées HV et VH.

A partir de la matrice de rétrodiffusion associée à la croix et vu son angle d'orientation de +45°, on vérifie que celle-ci rétrodiffuse une onde dont la polarisation est orthogonale à celle émise.

Cet exemple d'Image Electromagnétique Haute Résolution montre que seule la connaissance de la matrice de rétrodiffusion permet une discrimination totale.

7 L'IMAGE RADAR ET LA DISCRIMINATION DE CIBLES

Nous avons montré au paragraphe précédent qu'il est indispensable de connaître la matrice de rétrodiffusion d'une cible afin de construire une Image Radar Electromagnétique Haute Résolution "performante" pour la discrimination.

Nous allons maintenant déterminer à partir de la connaissance de ces quatre images la polarisation optimale qu'il aurait fallu donner à l'onde incidente afin d'obtenir une image unique qui soit performante au sens de la discrimination.

Pour cela nous allons utiliser les techniques propres à la Polarimétrie, techniques qui vont maintenant être développées au cours des prochains paragraphes.

7-1 Polarisation des ondes planes [2][3].

Un vecteur de polarisation d'une onde plane \underline{E} possède deux composantes E_x et E_y appartenant à des directions orthogonales à la direction de propagation, représentée par le vecteur \underline{k} . En travaillant dans le plan complexe on définit le vecteur de polarisation complexe \underline{E} d'une onde plane par:

$$\underline{E} = \begin{bmatrix} a_x \cdot e^{j\alpha_x} \\ a_y \cdot e^{j\alpha_y} \end{bmatrix} \text{ avec } \underline{E}_t = R_o \cdot \left[\underline{E} \cdot e^{j(\omega t - kz)} \right] \quad (8)$$

Le vecteur de polarisation complexe \underline{E} peut s'écrire sous la forme:

$$\underline{E} = a \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\tau) \\ j\sin(\tau) \end{bmatrix} e^{j\alpha} \quad (9)$$

où a représente la magnitude de l'onde, α la phase absolue, ϕ l'orientation et τ le taux d'ellipticité de l'ellipse de polarisation associée au vecteur \underline{E} .

7-2 Rapport de Polarisation-

La multiplication d'un vecteur de polarisation complexe \underline{E} par un scalaire réel ou complexe ne doit en aucun cas influencer sur l'état de polarisation de l'onde. Afin d'éliminer tout facteur de proportionnalité on définit le rapport de polarisation ρ avec:

$$\rho = \left| \frac{a_y}{a_x} \right| e^{j\delta} = \frac{\sqrt{\sin^2(\phi)\cos^2(\tau) + \cos^2(\phi)\sin^2(\tau)}}{\sqrt{\cos^2(\phi)\cos^2(\tau) + \sin^2(\phi)\sin^2(\tau)}} e^{j\delta}$$

avec: $\delta = \text{Arctg} \left[\frac{\text{tg}(2\tau)}{\sin(2\phi)} \right] \quad (10)$

Dans la suite, l'état de polarisation d'une onde sera représentée par le rapport de polarisation associé au vecteur complexe \underline{E} .

7-3 Polarisations remarquables [2][3][4].

L'étude des propriétés algébriques de la

matrice de rétrodiffusion [S] montre qu'il existe des polarisations remarquables de l'antenne d'émission pour lesquelles la puissance reçue dans les canaux de réception peut être contrôlée. Kennaugh a montré qu'il existait des états de polarisation pour lesquels la puissance reçue pouvait soit être:

- annulée dans les canaux de réception de même polarisation qu'à l'émission. Ces états sont connus sous le nom de COPOLL Nulls.

- annulée dans les canaux de réception de polarisation orthogonale à celle de l'émission. Ces états de polarisation sont connus sous le nom de XPOLL Nulls.

Ces polarisations remarquables sont obtenues en résolvant un problème de valeurs propres à partir de la matrice de puissance de Graves [P] qui est définie comme suit:

$$[P] = [S]^* [S] \quad (11)$$

D'une manière générale, on détermine le vecteur XPOLL sous la forme:

$$\underline{X1} = \frac{1}{(1+|\rho|^2)^{1/2}} \begin{bmatrix} 1 \\ \rho \end{bmatrix} \quad (12)$$

où ρ est le rapport de polarisation du XPOLL avec:

$$\rho = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4|A|^2}}{2|A|} \quad \text{où: } B = |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 \quad (13)$$

$$A = S_{11}^* S_{12} + S_{12}^* S_{22}$$

On obtient le vecteur XPOLL $\underline{X2}$ orthogonal au vecteur XPOLL $\underline{X1}$ avec:

$$\underline{X2} = \frac{1}{(1+|\rho|^2)^{1/2}} \begin{bmatrix} -\rho^* \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Ces deux vecteurs forment une base orthogonale de vecteurs de polarisation, d'où la matrice unitaire de transformation [U]:

$$[U] = [\underline{X1}, \underline{X2}] \quad (15)$$

La matrice de puissance de Graves [P] est alors diagonalisable avec:

$$[Pd] = [U]^{-1} [P] [U] \quad (16)$$

A partir de (16), il est alors possible de diagonaliser la matrice de rétrodiffusion [S]:

$$[Sd] = [U]^T [S] [U] \quad (17)$$

Ainsi la détermination des vecteurs XPOLL $\underline{X1}$ et $\underline{X2}$ permet d'obtenir une base orthogonale de vecteurs de polarisation dans laquelle la matrice de rétrodiffusion est diagonalisée ce qui correspond à une puissance de réception nulle dans les canaux cross-polarisés.

7-4 Application à l'image radar.

Afin de construire une image unique qui soit optimale pour la discrimination de cibles radar, nous allons déterminer la polarisation remarquable qui va minimiser la puissance reçue dans les canaux cross-polarisés et maximiser la puissance dans le canal correspondant au coefficient S_{11} . A partir de la connaissance des matrices de rétrodiffusion obtenues dans la base canonique des vecteurs de polarisation, à savoir horizontal et vertical, on construit les quatre images radar (voir figure n°4), puis on fabrique l'"Image SPAN" (figure n°5) suivant la relation:

$$\text{Span}[S] = |S_{11}|^2 + 2 \cdot |S_{12}|^2 + |S_{22}|^2 \quad (18)$$

où le Span[S] représente la puissance totale transportée par la matrice de rétrodiffusion.

A partir de l'image Span, il est alors possible, suivant un balayage lignes/colonnes de déterminer précisément la localisation des maxima de l'image. A partir de chacun de ces maximum, correspondant à une zone brillante de l'image radar, on détermine avec (11) le



vecteur de polarisation XPOLL associé. Le vecteur de polarisation XPOLL optimal de l'image toute entière est alors obtenu avec:

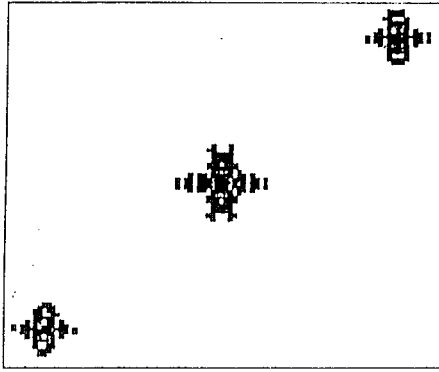


Figure n°5: Image SPAN.

$$\rho_{opt} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{span}_i \cdot \rho_i}{\sum_{i=1}^N \text{span}_i} \quad (19)$$

où span_i représente la valeur du Spant(S) associé à un maximum de l'image. A partir de ρ_{opt} on fabrique la matrice unitaire de transformation [Uopt] grâce à (15), puis on effectue le changement de base entre la base canonique et la base optimale ainsi déterminée. A partir des nouvelles matrices de rétrodiffusion déterminées suivant:

$$[S'] = [U]^T [S] [U] \quad (20)$$

construit l'image radar correspondant au coefficient S'_{11} (voir figure n°6).

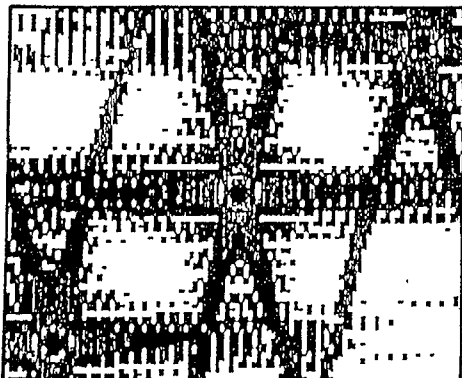


Figure n°6: Image Radar Optimale

Cette image permet d'une part une réduction du volume de l'information et d'autre part une bonne discrimination de la cible, car toute l'information relative à celle-ci y est contenue. Cette image aurait pu être obtenue en utilisant une polarisation unique à l'émission comme à la réception, polarisation correspondant au vecteur de polarisation XPOLL précédemment déterminé. Dans notre exemple, le rapport de polarisation optimale étant égal à $\rho = 0.131 + j0.315$, implique que le vecteur de polarisation optimale soit purement elliptique.

Ainsi il a été possible d'obtenir, sans connaissance a priori de la cible, une image radar qui soit performante au sens de la discrimination, sans agir physiquement sur les antennes, uniquement grâce aux techniques de la Polarimétrie.

De plus, ce traitement nous a permis de déterminer la polarisation de l'onde incidente pour laquelle la cible, d'une manière générale, était la plus sensible du point de vue puissance de rétrodiffusion.

Le traitement mis en oeuvre pour obtenir une telle image est représenté figure n°7.

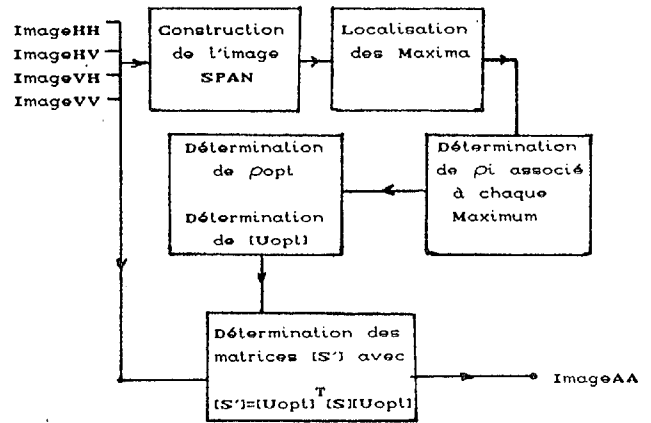


Figure n°7: Détermination de l'image optimale.

8 CONCLUSION.

L'introduction du concept de la Polarimétrie dans l'élaboration d'Images Electromagnétiques Haute Résolution permet d'améliorer la discrimination de cibles radar, grâce à toute l'information relative à la cible contenue dans la matrice de rétrodiffusion. De plus la Polarimétrie, grâce à son principe des polarisations remarquables, permet de construire une image unique qui soit optimale au sens de la discrimination.

L'étude actuellement menée vise à valider, par des mesures sur cibles réelles, les méthodes décrites dans cet article.

En parallèle avec l'étude de l'Image Electromagnétique Haute Résolution développée dans cet article, sont venus se greffer les problèmes classiques de la reconnaissance et de la classification des cibles radar. L'objectif de nos futurs travaux sera alors de déterminer qu'elles sont les caractéristiques physiques et géométriques de la cible qui induisent les points brillants. L'apport de la Polarimétrie dans cette étude sera importante puisque grâce à ses méthodes générales de classification et de reconnaissance, nous pourrions développer des outils et des méthodes permettant d'obtenir toute l'information relative aux caractéristiques de la cible à reconnaître.

Les auteurs tiennent à remercier le CELAR (Centre Electronique de l'Armement 35170 BRUZ) sans qui, cette étude n'aurait pu être menée à bien.

9 REFERENCES.

- [1] LE CERTEN, G., "RECONSTRUCTION COHERENTE D'IMAGES DE CIBLES RADAR", Thèse de l'Université de RENNES I (1985)
- [2] HUYNEN, J. R., "PHENOMENOLOGICAL THEORY OF RADAR TARGET", Ph. D. Dissertation, DRUKKERIJ Broder-Offset, N. V ROTTERDAM (1970)
- [3] BOERNER, W.-M., HUYNEN, J. R., MATHUR, N. C. and al "POLARIZATION UTILIZATION IN RADAR TARGET RECONSTRUCTION", Final Report, UIC-EECS-CL-EMID-ARO/EL. 83.12.14. Contract n°US-ARMY DAAG-29-80-12-0027 (14 December 1983)
- [4] KENNAUGH, E. M., "POLARIZATION DEPENDENCE ON RADAR ECHOES", Antenna Laboratory, Department of Electrical Engineering, Ohio State University, Contract AF 30(635)-2811(RADC) Reports n°612-1 to 612-16 (1955-1957)
- [5] POTTIER, E., "CONTRIBUTION DE LA POLARIMETRIE DANS LA DISCRIMINATION DE CIBLES RADAR" 1er Rapport d'études, Université de RENNES-CELAR (Octobre 1987-Juin 1988)