

# Imagerie d'objets mobiles à l'aide d'un radar bande étroite multistatique

G. GINOLHAC, F. DAOUT et F. SCHMITT

GEA, Univ. Paris X, PST Ville d'Avray, 1 ch. Desvallières 92410 Ville d'Avray

guillaume.ginolhac,franck.daout,françoise.schmitt@u-paris10.fr

**Résumé** – Cet article traite de l'imagerie de cibles mobiles à l'aide d'un radar multistatique (dans notre cas plusieurs émetteurs et un seul récepteur). Tout d'abord, nous développons un algorithme original multistatique basé sur les méthodes spatio-temporelles de Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO). Comme le signal émis est bande étroite et que sa fréquence centrale est faible, les résolutions finales de l'image dépendent principalement de deux paramètres : le nombre d'émetteurs et la longueur de l'antenne synthétique. La fonction d'ambiguïté du système est calculé numériquement pour étudier l'influence de ces deux paramètres. Ensuite, l'algorithme développé est testé sur des cibles réalistes. Les images sont intéressantes et permettent des premiers résultats de classification. A l'aide des modèles numériques des cibles, nous montrons aussi l'importance du placement des émetteurs ainsi que la nécessité d'un second récepteur.

**Abstract** – This article deals with the imagery of mobile targets by using a multistatic radar (several transmitters and one receiver). First, we develop an original multistatic algorithm based on spatio-temporal Synthetic Aperture Radar (SAR) methods. As the transmitted signal is narrowband and the central frequency is weak, the final resolutions of the image depend on two parameters: the number of transmitters and the synthetic array length. The ambiguity function of the multistatic system is used to study the influence of these both parameters. We check this algorithm on realistic targets. Obtained images are interesting and allow first classification results. Thanks to numerical models of targets, we also show the importance of the transmitters locations as well as the need of a second receiver.

## 1. Introduction

Le Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) [1] consiste à utiliser le mouvement du radar dans le but de simuler une antenne de grande taille et donc obtenir une très bonne résolution spatiale. Si les signaux émis par le radar sont larges bandes, alors il est possible d'avoir une image tout à fait correcte de la zone couverte par le RSO. Le problème dual au RSO consiste à utiliser le mouvement de la cible que l'on désire imager et au contraire d'avoir un radar fixe. Ce type de système est appelé Radar à Synthèse d'Ouverture Inverse (RSOI) [1] [4]. On considère dans cet article ce type de système mais avec quelques caractéristiques particulières : la fréquence centrale du signal émis est assez petite (de 100 MHz à 800 MHz suivant l'application), la bande est étroite (moins de 100 kHz), le radar est multistatique. Dans ce papier, il est constitué de plusieurs émetteurs et d'un seul récepteur. Ce type de système peut se retrouver dans les radars passifs multistatiques fonctionnant avec des émetteurs FM ou TV [4]. Dans ce cas, on utilise les signaux d'opportunité pour imager une cible qui se déplacerait dans la zone couverte par le radar.

Néanmoins, l'imagerie est très délicate à cause des caractéristiques décrites ci-dessus. Tout d'abord, le caractère multistatique du radar nécessite de faire évoluer les algorithmes d'imagerie [1] [3] existants. Afin d'atteindre des résolutions correctes, il faut agir en particulier sur deux paramètres : augmenter le nombre d'émetteurs pour pallier à l'aspect bande étroite des signaux et augmenter la longueur d'antenne synthétique (temps d'illumination de la cible) pour

contrer la faiblesse de la fréquence centrale. Nous calculons le **fonction d'ambiguïté** du système pour étudier l'influence de ces deux paramètres sur les résolutions ainsi que sur l'importance des lobes secondaires (*Principal Lobe Secondary Ratio : PLSR*). Nous montrons ensuite l'intérêt de ce type de système pour classifier des cibles réalistes [2]. Ainsi, des cibles blanches en fréquence mais anisotrope spatialement sont utilisées. La première hypothèse est justifiée par la largeur de bande du signal considérée. En revanche, l'anisotropie spatiale permet de décrire un comportement réaliste de cible vis à vis des différentes positions des couples émetteurs – récepteurs. Par ce biais, l'importance des positions des émetteurs sera évaluée.

Cet article est organisé de la façon suivante : nous présentons dans la section 2 le contexte et l'algorithme multistatique d'imagerie. Dans la section 3, nous donnons les performances de cet algorithme. Finalement, nous l'appliquons dans la section 4 sur deux cibles géométriquement proches pour le tester dans des conditions non favorables.

## 2. Algorithme d'imagerie

Le schéma du système radar étudié est montré sur la figure 1. Un repère fixe  $(0, x, y, z)$  est utilisé pour fournir les localisations du récepteur  $R(x_r, y_r, -h)$  et des  $M$  émetteurs  $E_i(x_{ei}, y_{ei}, -h)_{1 \leq i \leq M}$ . La cible se déplace le long de l'axe  $y$  et est vue par le récepteur entre  $y_{min}$  et  $y_{max}$ . Un repère mobile  $(x', y', z')$  est utilisé pour décrire la cible à imager. Son origine

est localisée sur l'axe  $y$  et il suit le mouvement de la cible. Comme pour le RSO, nous faisons l'hypothèse « *stop and go* » (la cible est supposée fixe pendant un certain temps puis se déplace directement à la position suivante) qui permet de décrire le mouvement de la cible. Le repère mobile est ainsi localisé à certains points tous les  $\Delta y$  (échantillonnage spatial).

La cible est supposée avoir une vitesse uniforme linéaire de 150 m/s. Le signal émis, noté  $e$ , est une Fréquence Modulée Linéairement (FML) de fréquence centrale  $f_0=300$  MHz, de bande spectrale  $B=75$  kHz et de durée  $T=0.2$  ms. Ce type de signal a des propriétés spectrales proches des signaux FM ou TV [4] [5] car la bande est très petite et la fréquence centrale est très inférieure à celle des applications de RSOI traditionnelles [1]. L'échantillonnage temporel  $f_e$  est égal à 170 kHz, alors que l'échantillonnage spatial  $\Delta y$  est égal à 0.25 m. Pour tester l'algorithme d'imagerie, nous utilisons  $M=103$  émetteurs localisés dans un carré de 100 km×100 km. Leur disposition est réaliste car elle est identique à celle des émetteurs FM près de Guéret.

L'algorithme multistatique est ici développé à partir des méthodes spatio-temporelles car les méthodes fréquentielles sont très difficiles à mettre en oeuvre dans des configurations multistatiques générales. Tout d'abord, nous donnons la relation du retard que met l'onde entre l'émetteur  $i$ , un point situé dans le repère mobile (sa position est repérée par  $n$ ) à la position  $(x', y', 0)$  et finalement le récepteur :

$$\delta_i(n, x', y') = \frac{1}{c} \left( \sqrt{(x_{ei} - x')^2 + (y_{\min} + n\Delta y + y' - y_{ei})^2} + h^2 + \sqrt{(x_r - x')^2 + (y_{\min} + n\Delta y + y' - y_r)^2} + h^2 \right)$$

Le modèle du signal reçu est donné par :

$$m(t, n, x', y') = \sum_{i=1}^M e(t - \delta_i(n, x', y'))$$

où  $t=k/f_e$  est le retard pour chaque position du repère mobile qui est aussi la position de la cible à  $y_{\min} + n\Delta y$ . Alors, l'algorithme consiste à effectuer la corrélation entre le signal reçu  $s$  et le modèle  $m$  afin d'obtenir l'image  $I(x', y')$  de la cible :

$$I(x', y') = \sum_{n=1}^N \int_{t=0}^{T_{acq}} s(t, n) m^*(t, n, x', y') dt$$

où  $T_{acq}$  est la durée d'acquisition du signal reçu pour chaque position de la cible et  $N$  est le nombre total de positions du repère mobile ( $y_{\max} - y_{\min} = N\Delta y$ ). Ce programme est notée Corrélation Spatio-Temporel Multistatique (CSTM). Une version plus rapide de cet algorithme est possible en calculant le filtre adapté pour chaque position de la cible avant le processeur RSOI. Ceci est inspiré par l'algorithme *Back Projection* [1] développé pour les RSO monostatique. Cet algorithme est noté *Back Projection* Multistatique (BPM).

### 3. Performances du BPM

Dans cette partie, nous exprimons la fonction d'ambiguïté du système multistatique décrit dans ce papier. Celle ci représente le produit scalaire entre les signaux émis par deux points brillants localisés en différents lieux de l'espace. L'un est supposé centré à l'origine du repère mobile, alors que le second est localisé à la position  $(x', y')$  :

$$A(x', y') = \sum_{n=1}^N \int_{t=0}^{T_{acq}} \sum_{i=1}^M e(t - \delta(n, 0, 0)) e^*(t - \delta(n, x', y')) dt$$

Il est très difficile de calculer analytiquement cette expression et donc nous proposons de l'évaluer

numériquement. En particulier, nous étudions les évolutions des résolutions à  $-3$  dB et de la PLSR en fonction du nombre d'émetteurs et de la longueur de l'antenne synthétique ( $y_{\max} - y_{\min}$ ). La figure 2 montre l'évolution de la résolution pour les deux axes  $x'$  et  $y'$  en fonction du nombre d'émetteurs. La longueur de l'antenne synthétique est ici égale à 3 km. Nous notons qu'une résolution correcte (autour de 1 m qui est proche de  $\lambda = c/f_0$ ) est atteinte dans les deux axes avec seulement 10 émetteurs (ils sont choisis aléatoirement parmi les 103 émetteurs présentés dans la section 2). La figure 3 montre, pour les mêmes paramètres de simulation, l'évolution de la PLSR pour les deux axes en fonction du nombre d'émetteurs. Un résultat correct (autour de  $-10$  dB) est atteint avec **50 émetteurs**. Nous faisons la même étude en fonction de la longueur de l'antenne synthétique (le nombre d'émetteurs est fixé dans ce cas à 21). Nous donnons les principaux résultats : des résolutions correctes et une PLSR assez faibles sont possibles avec une longueur d'antenne synthétique de **70 km**.

Cette section a permis de montrer que l'image d'une cible est possible même si le radar est bande étroite et une faible fréquence centrale. Mais, l'imagerie nécessite d'avoir à disposition plusieurs émetteurs et surtout une importante longueur d'antenne synthétique. Ce dernier point est un défaut de la méthode proposée car celle-ci nécessite que la cible soit stationnaire durant toute la longueur de l'antenne synthétique. Il paraît donc ambitieux qu'une cible reste aussi longtemps stationnaire et cela nécessite une étude plus précise.

## 4. Simulation sur cibles réalistes

La procédure de simulation pour calculer et insérer les signatures des cibles est présentée dans [2]. Nous considérons 2 cibles (voir figure 4) : un cylindre avec un cône et le même cylindre avec deux ailes et une dérive. Les différences ne sont pas importantes, et de plus, leur taille est faible (autour de  $3\lambda$ ) et donc la classification entre ces deux cibles risquent d'être difficiles. Tout d'abord, nous rappelons les résultats obtenus dans [2] avec un radar bistatique et une longueur d'antenne synthétique de 70 km. Seule la longueur du cylindre était mesurable sur les deux images et de plus la classification entre les deux cibles était impossible. Nous effectuons la même simulation mais en considérant 103 émetteurs. Les figures 5 et 6 montrent les images, obtenues par le BPM, des deux cibles pour la polarisation principale. Nous pouvons noter que la longueur et la largeur du cylindre sont mesurables. De plus, l'image de l'avion contient des zones d'énergies plus importantes et certaines faibles différences sont visibles (comme montré par le cercle noir). La figure 7 montre les mêmes résultats pour une polarisation croisée. Le niveau de l'image du cylindre est très faible alors qu'il reste important pour l'avion. La classification en polarisation croisée entre les deux cibles est donc simple grâce à l'algorithme développé. Les différences proviennent principalement de la présence des ailes.

Nous désirons maintenant expliquer les résultats obtenus. Les phases des Section Electromagnétique Radar (SER) des deux cibles sont montrées sur les figures 8, 9, 10 et 11 pour les polarisations principales et croisées. Les angles incidents et reçus pour la simulation considérée sont ajoutés aux

figures. Tout d'abord, nous notons que les phases des SER en polarisation croisée sont très différentes entre le cylindre et l'avion. Il est donc normal que la classification dans ce mode soit assez facile. Pour la polarisation principale, les différences sont moins importantes et de plus certaines zones comportant des différences ne sont pas prises en compte par le radar multistatique (par exemple dans le cercle noir). Le résultat de classification présenté n'est donc pas optimal. En fait, nous notons l'importance d'avoir des émetteurs localisés dans toute la zone pour couvrir tous les angles  $(\theta, \theta_s)$ . Il semble aussi qu'un second récepteur serait intéressant pour avoir plus de couples  $(\theta, \theta_s)$ .

## 5. Conclusion

Nous avons développé un algorithme original d'imagerie d'objets mobiles pour un radar bande étroite multistatique. La fonction d'ambiguïté du système est numériquement calculée pour étudier les performances du radar multistatique. Nous montrons l'importance du nombre d'émetteurs et de la longueur de l'antenne synthétique pour obtenir une image correcte d'une cible. Finalement, nous appliquons cet algorithme sur deux cibles légèrement différentes. Nous montrons que les images obtenues permettent plusieurs mesures ainsi que des premiers résultats de classification. De plus, nous montrons l'importance du placement des émetteurs et l'intérêt de l'apport d'un second récepteur pour une meilleure classification.

## Références

- [1] M. Soumekh. "Synthetic Aperture Radar Signal Processing", Wiley – Interscience Publication, 1999.
- [2] F. Daout, G. Ginolhac, F. Schmitt and M. Lesturgie, "Passive Bistatic Radar Imagery of Targets Modelled by NEC", *RADAR 2004, Toulouse, FRANCE*, 2004.
- [3] M. Soumekh. "Bistatic Synthetic Aperture Radar Inversion with application in Dynamic Object Imaging", *IEEE Trans. on Signal Proc.*, vol. 39, n°9, pp 2044-2055, 1991.
- [4] Y. Wu and D.C. Munson. "Multistatic Synthetic Aperture Imaging of Aircraft using Reflected Television Signals", in *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imaging VIII*, Proc. SPIE 4382, Ed. E.G. Zelnio, Orlando, FL, April 2001.
- [5] P. Forster and M. Lesturgie, "Passive Radar for Target Tracking and Classification", *RADAR 2004, Toulouse, FRANCE*, 2004.

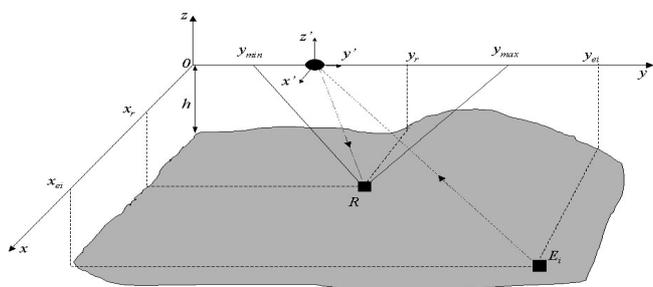


FIG. 1 : Schéma du radar multistatique.

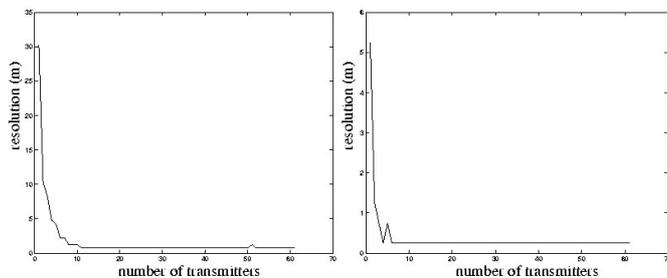


FIG. 2 : Evolution des résolutions sur les axes  $x'$  (gauche) et  $y'$  (droite) en fonction du nombre d'émetteurs.

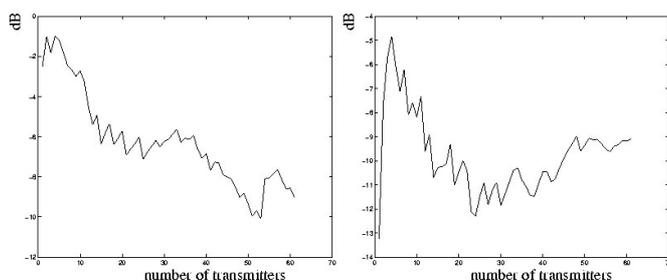


FIG. 3 : Evolution de la PLSR sur les axes  $x'$  (gauche) et  $y'$  (droite) en fonction du nombre d'émetteurs.

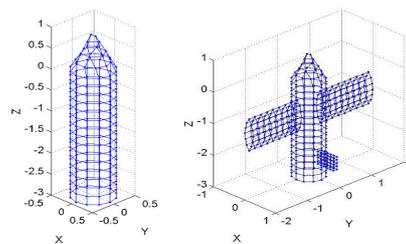


FIG. 4 : Modèles de cibles : cylindre (gauche) et avion (droite).

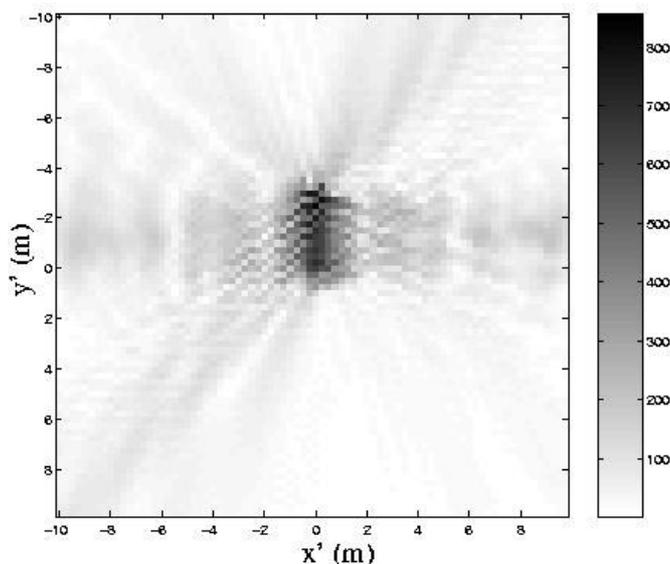


FIG. 5 : Image multistatique du cylindre en polarisation principale.

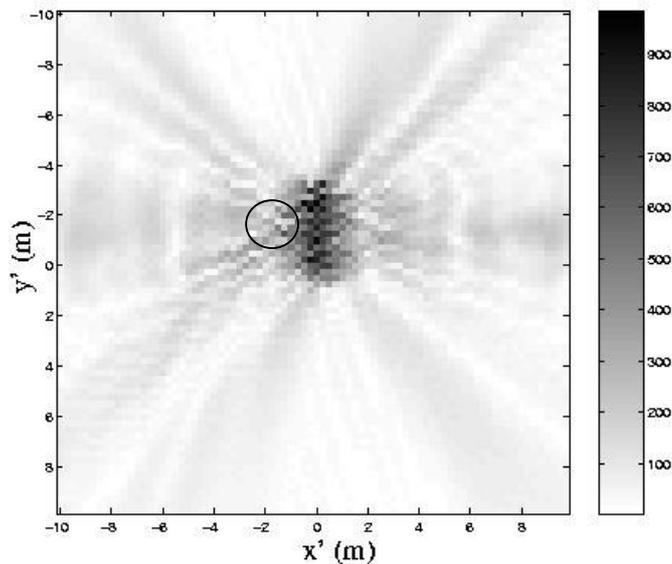


FIG. 6 : Image multistatique de l'avion en polarisation principale.

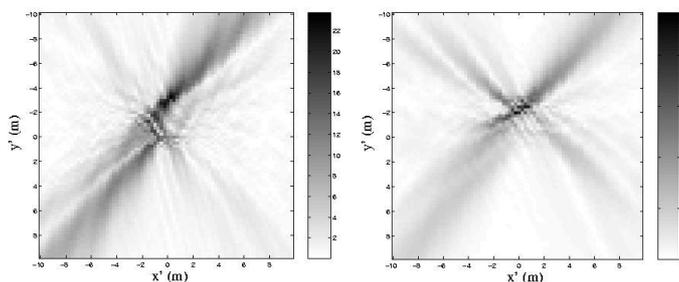


FIG. 7 : Images multistatiques du cylindre (gauche) et de l'avion (droite) en polarisation croisée.

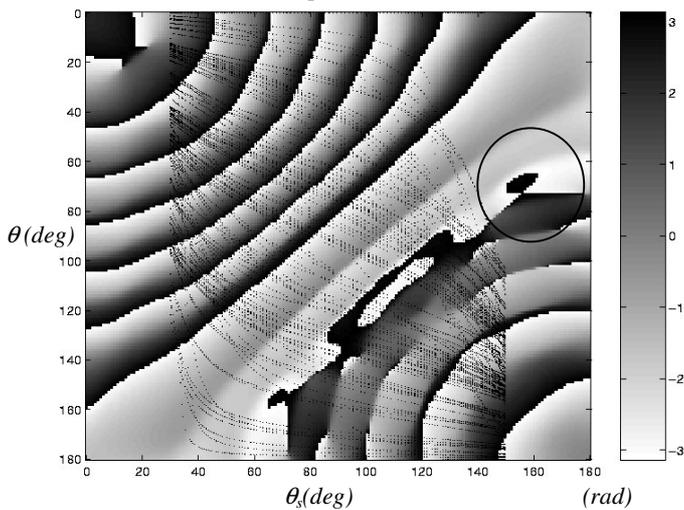


FIG. 8 : Phase de la SER du cylindre en polarisation principale.

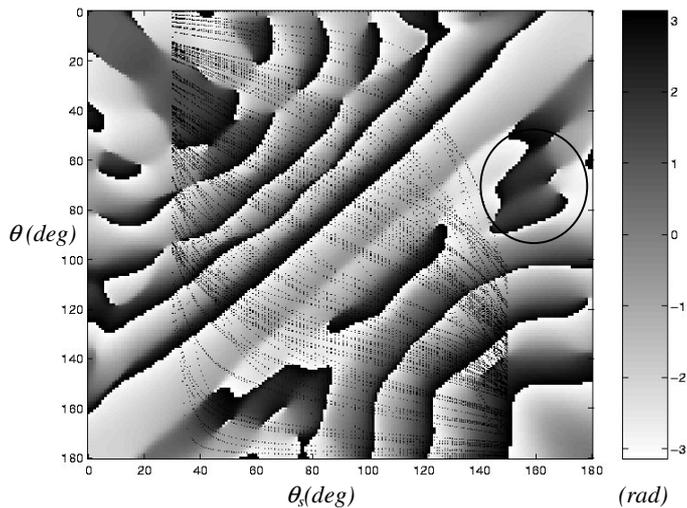


FIG. 9 : Phase de la SER de l'avion en polarisation principale.

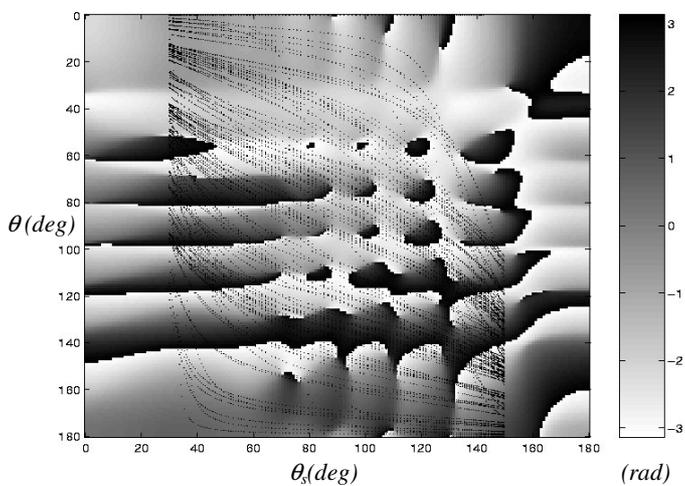


FIG. 10 : Phase de la SER du cylindre en polarisation croisée.

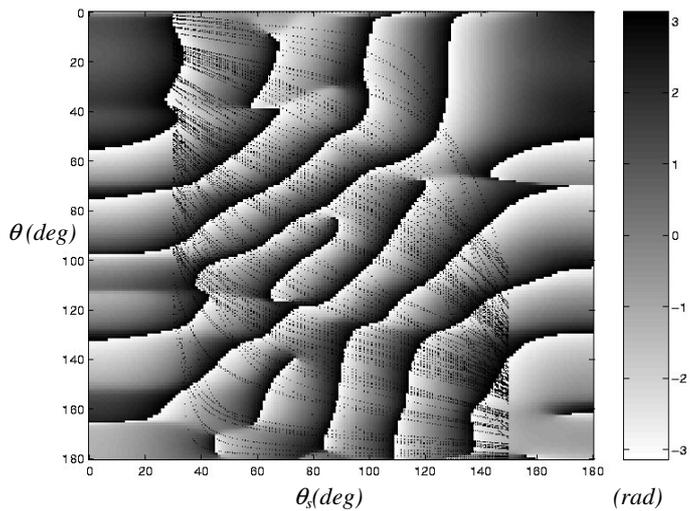


FIG. 11 : Phase de la SER de l'avion en polarisation croisée.