



**HAL**  
open science

# Estimation de la trajectoire de petites cibles métalliques à l'aide d'un système d'imagerie radar à ondes millimétriques

E Dedic, D Henry, M Lihoreau, H Aubert

► **To cite this version:**

E Dedic, D Henry, M Lihoreau, H Aubert. Estimation de la trajectoire de petites cibles métalliques à l'aide d'un système d'imagerie radar à ondes millimétriques. Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes, France. hal-04837037

**HAL Id: hal-04837037**

**<https://hal.science/hal-04837037v1>**

Submitted on 13 Dec 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Estimation de la trajectoire de petites cibles métalliques à l'aide d'un système d'imagerie radar à ondes millimétriques

E. Dedic<sup>1</sup>, D. Henry<sup>1</sup>, M. Lihoreau<sup>3</sup>, H. Aubert<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> LAAS, CNRS, 31400 Toulouse, France, {ededic, dhenry, haubert}@laas.fr

<sup>2</sup> Université de Toulouse, Toulouse, France

<sup>3</sup> CRCA-CBI, CNRS, Université Toulouse III, 31000 Toulouse, France, mathieu.lihoreau@univ-tlse3.fr

Auteur référent : ededic@laas.fr

**Résumé** – Dans cet article, nous proposons d'estimer la trajectoire de petits cylindres métalliques (quelques centimètres de long et 3 mm de diamètre) en utilisant un système d'imagerie radar à ondes millimétriques (77 GHz). Cette estimation est déduite de la détermination de la direction d'arrivée des signaux rétrodiffusés par ces cibles en mouvement lorsqu'elles sont éclairées par le faisceau orientable de l'imageur radar. Le clutter électromagnétique est traité par une méthode originale utilisant un algorithme de segmentation d'images par isolignes. L'application visée est la détection des positions au cours du temps d'insectes en vol tagués avec de petites structures métalliques afin de réaliser des études comportementales systématiques.

## 1. Introduction

Comprendre comment les insectes pollinisateurs se déplacent entre les sites de nourriture est d'un intérêt majeur en éthologie et écologie. Cependant, l'observation de leurs trajectoires en milieu naturel est une tâche difficile [1]. Et pour cause, étudier l'activité d'insectes en vol, comme les abeilles ou les bourdons, requiert l'observation de petits individus (moins de 2cm de long), rapides (vitesse de l'ordre de 20km/h) et se déplaçant dans les 3 dimensions de l'espace, parfois sur de grandes distances (plusieurs km) et durant plusieurs jours. Des technologies radiofréquences, comme le radar harmonique [2] et la radio-téléométrie (ou radiopistage) [3], ont déjà été utilisées à cet effet. Ces approches permettent de suivre les insectes sur plusieurs centaines de mètres au prix d'une faible résolution spatio-temporelle (typiquement 10m et 1s). Par ailleurs, l'estimation de la trajectoire en 3D n'est pas possible avec ces techniques, car l'insecte n'est détecté que lorsqu'il franchit un plan de coupe (détection 2D). Une autre technique prometteuse consiste à utiliser des tags photoluminescents et une caméra infra-rouge [4]. Cette solution a été appliquée avec succès à la détection dans un plan de bourdons en extérieur et sur une large surface de détection (2,0m<sup>2</sup>). Cependant, collecter des trajectoires en 3D de ces insectes est essentiel pour une compréhension fine de leurs comportements de navigation, même si cela n'est effectué qu'à faibles distances. Cela est possible avec des caméras optiques rapides [5], mais cette technique est limitée par son faible volume de détection et par l'encombrement du réseau de caméras rendant ce système statique en pratique. Récemment, nous avons démontré qu'un système d'imagerie radar à ondes millimétriques pouvait être utilisé pour détecter plusieurs insectes en vol et non équipés de transpondeurs [6]. Cette solution utilise un radar à ondes continues (CW) et à modulation de fréquence (FM) dont le faisceau est balayé mécaniquement en élévation et électroniquement en azimut. Des insectes en vol ont ainsi pu être détectés à courte distance (quelques mètres) et dans des environnements qui rétrodiffusaient faiblement les ondes électromagnétiques émises par le radar.

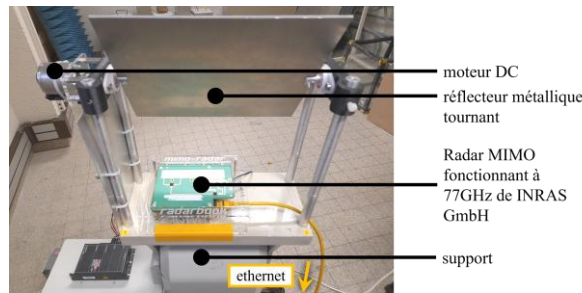
Afin d'étendre l'utilisation des systèmes radar à ondes millimétriques à la détection au cours du temps des positions d'insectes en vol dans leur environnement naturel, nous proposons dans cet article une technique de réduction du clutter électromagnétique basée sur un algorithme original de segmentation d'images par isolignes, c'est-à-dire par des chemins le long desquels le niveau d'écho radar est quasiment le même [7]. Cette technique est testée ici pour l'estimation de la trajectoire de petits cylindres métalliques en mouvement dans des environnements générant un clutter électromagnétique plus ou moins fort.

## 2. Système d'imagerie radar à ondes millimétriques

### 2.a. Balayage mécanique du faisceau radar

Pour détecter de petits (quelques centimètres de long) cylindres métalliques creux, on utilise dans cette étude le Radar FMCW MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) opérant à 77 GHz commercialisé par la société INRAS GmbH [8]. Ce radar effectue un balayage électronique du faisceau en azimut à partir d'un canal de transmission ( $T_X$ ) et de seize canaux de réception ( $R_X$ ). Pour chaque canal ( $T_X$  ou  $R_X$ ), l'antenne utilisée est un réseau de 6 patches rectangulaires. Nous ajoutons à ce radar un réflecteur tournant (plaque métallique rectangulaire de 20cm × 25cm) placé à 15cm au-dessus du radar et qui permet de balayer mécaniquement le faisceau en élévation (**Figure 1**). La fréquence d'acquisition des données radar à l'aide de ce système dépend de la vitesse de rotation du réflecteur. La vitesse de rotation choisie (500rpm) permet

d'acquérir environ 16 images par seconde. La modulation de fréquence (en dent de scie) est réalisée sur la bande de 3GHz autour de la fréquence de fonctionnement (77GHz) du radar, ce qui permet de garantir une résolution (théorique) en profondeur de 5cm. La puissance électromagnétique rayonnée par le radar est d'environ 10mW.



**Figure 1. Le système d'imagerie radar à ondes millimétriques utilisé pour détecter au cours du temps la position de petits cylindres métalliques en mouvement dans la scène. Le balayage du faisceau en élévation est assuré par la rotation du réflecteur métallique tournant à 500rpm.**

### 2.b. Acquisition et traitement des données radar

Un chirp est émis toutes les millisecondes et le signal rétrodiffusé par la scène éclairée par le radar est reçu par les 16 canaux  $R_x$ . L'amplitude du signal reçu est stockée durant la mesure dans une matrice dont les 3 dimensions sont les suivantes : le rang du canal de réception, le temps de montée (*fast time*) et la durée de mesure. La construction des images radar 3D à partir des données de mesure brutes est illustrée sur la **Error! Reference source not found.** Pour réduire la durée du post-traitement, on limite les acquisitions à un secteur angulaire d'élévation de  $80^\circ$ . Ensuite, les données radar sont rangées par angle d'élévation croissant. On applique alors un algorithme de classification de signaux (MUSIC) [9] à chaque image radar pour estimer la direction d'arrivée (DoA) des signaux rétrodiffusés par la scène et obtenir ainsi une image radar 2D dont les dimensions sont les suivantes : la distance d'interrogation et l'azimut. Un pixel dans ces images contient le niveau d'écho radar à l'endroit de ce pixel. Un algorithme dit de *super-résolution* (zero-padding) est ensuite appliqué et finalement, les images 2D résultantes sont rangées par ordre d'élévation croissant afin de construire des images 3D. Ainsi, à partir des images radar brutes issues du système radar, on élabore des images 3D dont les dimensions sont les suivantes : la distance, l'azimut et l'élévation.

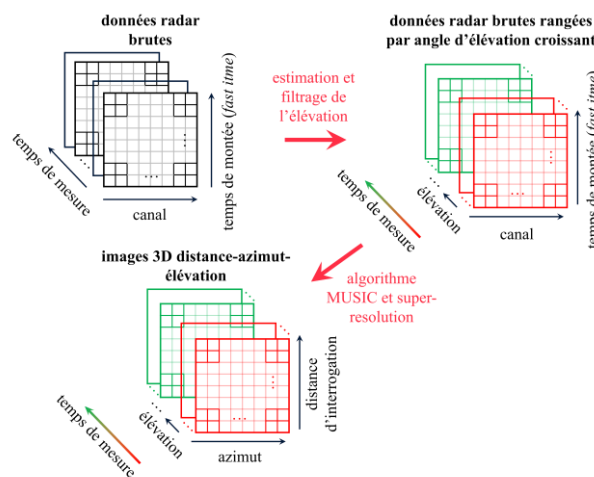
## 3. Algorithme de réduction de l'impact du clutter électromagnétique sur la détection des cibles en mouvement

Afin d'utiliser *in fine* le système d'imagerie radar dans des milieux naturels variés, nous avons développé une technique originale de réduction du clutter électromagnétique. Il s'agit de traiter les images radar 3D par une méthode de segmentation en isolignes. Le processus peut se résumer par les étapes suivantes :

- i. Balayage de la scène par le faisceau radar en absence des cibles à détecter. La collection d'images radar 3D ainsi acquise est stockée par temps de mesure croissant ;
- ii. Segmentation des images radar 3D par des isolignes le long desquelles le niveau d'écho radar est quasiment le même (voir [7] pour des détails sur cette méthode de segmentation d'images). Au sein de chaque surface délimitée par les isolignes, les coordonnées de l'écho maximal sont alors déterminées. Si cet écho est supérieur à celui d'un seuil prédéfini (ici -48dB), on considère que cette surface contribue significativement au clutter électromagnétique. Au final, le clutter est donc caractérisé par un ensemble de surfaces bordées par des isolignes et distribuées dans l'espace ;
- iii. Balayage de la scène par le faisceau radar en présence des cibles à détecter, puis segmentation des images radar 3D en isolignes. Les coordonnées des maxima locaux des échos sont alors déterminées. Lorsque ces coordonnées situent l'écho sur une des surfaces déterminées à l'étape *ii*, on considère qu'elles ne sont pas associées à la cible d'intérêt. Seules les coordonnées qui positionnent l'écho à l'extérieur de ces surfaces seront utilisées pour estimer la position au cours du temps des cibles d'intérêt ;
- iv. Estimation des positions au cours du temps des cibles d'intérêt à partir du calcul du barycentre de la collection des positions de maxima d'écho sélectionnées à l'étape *iii*.

Pour illustrer cet algorithme, une cible (cylindre métallique creux de 2cm de long et de 3mm de diamètre) est déplacée de gauche à droite devant le système radar plusieurs fois pendant 1 minute. Pour augmenter le clutter électromagnétique de la scène (une pièce du laboratoire), on place une sphère métallique statique de 5cm de diamètre entre le système radar et le cylindre à détecter, et à 17cm environ de ce cylindre (**Figure 4**). A partir de l'image radar de cette scène obtenue à partir de l'étape *i* de l'algorithme (c'est-à-dire en absence du cylindre cible et en présence de la sphère), on extrait la collection des points de détection associée au clutter électromagnétique généré par l'environnement (**Figure 4a**). Puis, en

présence du cylindre (étape *iii* de l'algorithme), on extrait la collection des coordonnées des maxima locaux des échos (**Figure 4b**). Après classification (étape *iii* de l'algorithme), 10035 points de détection sur un total de 11225 points de détection (89%) sont considérés comme des contributeurs au clutter électromagnétique (et non à la rétrodiffusion électromagnétique du cylindre). Par conséquent, 1190 points de détection (11%) sont attribués à la détection du cylindre cible. Cette classification est illustrée sur la **Figure 4c**. Sur cette figure, les détections du cylindre sont représentées en vert et les détections attribuées au clutter électromagnétique sont représentées en rouge. La **Figure 5** indique uniquement les détections du cylindre et de la sphère métallique. Après calcul du barycentre de l'ensemble des points de détections pour chaque image 3D de l'enregistrement (étape *iv* de l'algorithme), la trajectoire de la cible reconstruite par calcul de barycentre est portée par 680 positions dans l'espace. On peut observer sur la Figure 5 que l'ensemble des positions au cours du temps de la sphère métallique (statique) se situe au proche voisinage de la valeur vraie de la position. On observe également que le mouvement de balancier réalisé par le cylindre selon l'axe  $x$  est restitué par l'algorithme. Dans le Tableau 1, on donne l'écart-type de la distribution des coordonnées des points de détection du cylindre et de la sphère (cette dernière étant vue ici comme un contributeur au clutter électromagnétique). On constate que l'écart type de la distribution des coordonnées spatiales des détections suivant les axes  $x$  et  $z$  est bien plus élevé pour le cylindre que pour la sphère. Ceci peut s'expliquer par le fait que le rapport du nombre de détections avant et après le calcul des barycentres est bien plus élevé dans le cas de la sphère statique (10,1) que dans le cas du cylindre en mouvement (1,75). En effet, à un instant donné, la sphère métallique de 5 cm de diamètre est détectable dans un plus grand nombre de plans d'élévation que le petit cylindre. Par ailleurs, d'après la **Figure 5b**, on observe que le cylindre a été détecté pendant toute la durée de l'enregistrement radar, même lorsque la sphère de 5cm de diamètre est venue masquer le cylindre en se plaçant devant la cible. Néanmoins, un objet métallique de plus grande taille aurait certainement dégradé les performances de détection de l'algorithme proposé. Les limites de notre algorithme seront testées dans un avenir proche.



**Figure 2. Schéma représentant le processus de génération des images radar 3D. La donnée radar brute est réorganisée en images 3D à partir de l'angle d'élévation estimé.**

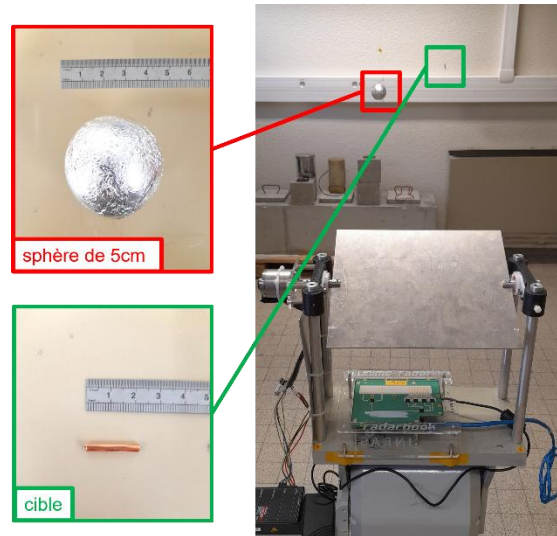


Figure 3. Photo du dispositif radar pour illustrer l'application de l'algorithme de traitement du clutter électromagnétique généré ici par une sphère métallique placée devant la cible à détecter.

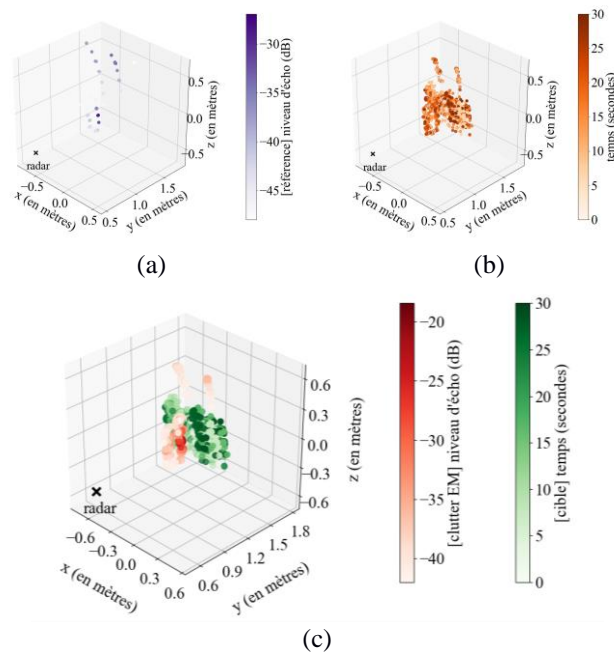
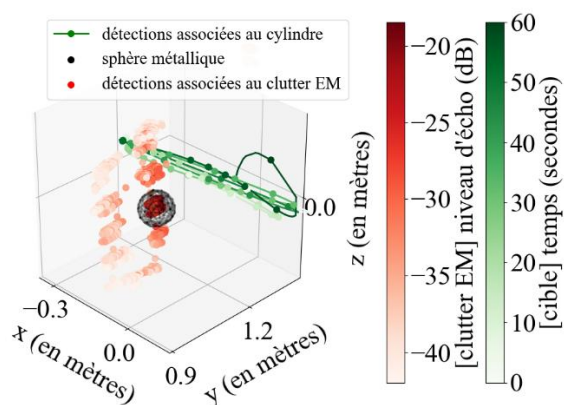
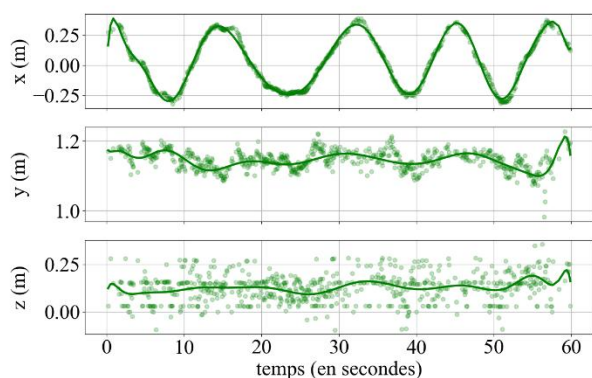


Figure 4. Illustration de l'algorithme visant à réduire l'impact du clutter électromagnétique sur les détections au cours du temps du cylindre cible. Les figures (a) et (b) représentent les positions au cours du temps des maxima d'écho radar (a) en absence et (b) en présence du cylindre à détecter ; La figure (c) donne une représentation des positions de ces maxima locaux attribués au clutter électromagnétique (en rouge) et au cylindre (en vert).



(a)



(b)

**Figure 5. (a) Trajectoire estimée du cylindre (en vert) et positions des échos attribués au clutter électromagnétique (en rouge) ; (b) Coordonnées estimées du cylindre (mobile) au cours du temps**

**Tableau 1. Ecart-type de coordonnées estimées au cylindre cible et de la contributrice au niveau**

	écart type sur la composante		
	selon x (cm)	selon y (cm)	selon z (cm)
cylindre	21	3	7
sphère	2	3	2

**la distribution des selon les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$  du sphère métallique de clutter électromagnétique**

## 4. Conclusion

Un algorithme de traitement du clutter électromagnétique basé sur le calcul d'isolignes dans des images radar a été présenté en vue de détecter le déplacement de petites cibles métalliques. L'algorithme est illustré dans le cas de l'estimation des positions au cours du temps d'un petit cylindre métallique oscillant à l'arrière d'une sphère métallique immobile. Dans des travaux futurs, nous allons tester les limites de cet algorithme. Nous allons également l'appliquer pour estimer la trajectoire de vol d'insectes munis de petites structures métalliques similaires aux cibles testées.

## 5. Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet ANR 3DNavibee (ANR-19-CE37-0024).

## Références



- [1] R. B. Freeman, 'Charles Darwin on the routes of Male Humble Bees', *Bull. Nat. Hist. Mus. Nat. Hist. Hist. Ser.*, vol. 3, no. 6, pp. 177–189, May 1968, doi: 10.5962/p.314502.
- [2] J. R. Riley *et al.*, 'Tracking bees with harmonic radar', *Nature*, vol. 379, no. 6560, Art. no. 6560, Jan. 1996, doi: 10.1038/379029b0.
- [3] P. J. Kennedy, S. M. Ford, J. Poidatz, D. Thiéry, and J. L. Osborne, 'Searching for nests of the invasive Asian hornet (*Vespa velutina*) using radio-telemetry', *Commun. Biol.*, vol. 1, no. 1, Art. no. 1, Jul. 2018, doi: 10.1038/s42003-018-0092-9.
- [4] T. Walter, J. Degen, K. Pfeiffer, A. Stöckl, S. Montenegro, and T. Degen, 'A new innovative real-time tracking method for flying insects applicable under natural conditions', *BMC Zool.*, vol. 6, no. 1, p. 35, Dec. 2021, doi: 10.1186/s40850-021-00097-3.
- [5] M. Lihoreau *et al.*, 'Radar Tracking and Motion-Sensitive Cameras on Flowers Reveal the Development of Pollinator Multi-Destination Routes over Large Spatial Scales', *PLOS Biol.*, vol. 10, no. 9, p. e1001392, Sep. 2012, doi: 10.1371/journal.pbio.1001392.
- [6] A. Dore, D. Henry, M. Lihoreau, and H. Aubert, '3D Trajectories of Multiple Untagged Flying Insects from Millimetre-wave Beamscanning Radar', in *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, Jul. 2020, pp. 1209–1210. doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329732.
- [7] D. Henry and H. Aubert, 'Isolines in 3D Radar Images for Remote Sensing Applications', presented at the 2019 16th European Radar Conference (EuRAD), Oct. 2019. Accessed: Jun. 20, 2023. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-03749987>
- [8] 'RadarBook2 INRAS'. [Online]. Available: <https://inras.at/en/radarbook2/>
- [9] Manokhin, 'MUSIC-based algorithm for range-azimuth FMCW radar data processing without estimating number of targets', 2015, doi: 10.1109/MMS.2015.7375471.