



HAL
open science

Modélisation et simulation de l'effet Micro-Doppler en théorie du radar : application aux avions

Sylvain Borderieux, Jean-Christophe Cexus, Ali Khenchaf

► **To cite this version:**

Sylvain Borderieux, Jean-Christophe Cexus, Ali Khenchaf. Modélisation et simulation de l'effet Micro-Doppler en théorie du radar : application aux avions. Journée Environnement Electromagnétique - ENVIREM, ONERA, Jun 2025, Palaiseau, France. <hal-05187035>

HAL Id: hal-05187035

<https://hal.science/hal-05187035v1>

Submitted on 25 Jul 2025

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.



HAL Authorization

Modélisation et simulation de l'effet Micro-Doppler en théorie du radar : application aux avions

1st Sylvain Borderieux
Lab-STICC UMR 6285

ENSTA, Institut Polytechnique de Paris
Brest, France
sylvain.borderieux@ensta.fr

2nd Jean-Christophe Cexus
Lab-STICC UMR 6285

ENSTA, Institut Polytechnique de Paris
Brest, France
jean-christophe.cexus@ensta.fr

3rd Ali Khenchaf
Lab-STICC UMR 6285

ENSTA, Institut Polytechnique de Paris
Brest, France
ali.khenchaf@ensta.fr

Abstract—La détection radar de petits avions tels que des drones représente un enjeu de sécurité majeur à cause de leur faible écho radar. Ce travail de recherche constitue une étude préliminaire de la signature Micro-Doppler des drones se concentrant sur les quadricoptères pour mettre en exergue les paramètres critiques pour la détection radar de drones. Nous utilisons un modèle d'optique physique utilisant des réflecteurs ponctuels pour générer le signal qui est interprété avec une analyse en temps-fréquence.

Index Terms—Radar, Micro-Doppler, Drone, Analyse temps-fréquence

I. INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, on assiste à une multiplication de l'utilisation des UAV (Unmanned Aircraft Vehicle) dans les secteurs civils et militaires pour remplir diverses missions. À l'origine, les drones sont utilisés par les armées pour effectuer des frappes et surveiller des sites sensibles. Aujourd'hui, les drones sont aussi utilisés pour des missions professionnelles comme le tournage de films ou le transport d'équipements dans des endroits difficiles d'accès. Cependant, ces UAV sont souvent fabriqués en plastique ou en fibre de carbone tout en étant plus petits et plus lents que les avions modernes. Cela leur confère une SER (Surface Equivalente Radar) très inférieure à celle des avions rendant la détection des drones difficile pour les radars modernes. De fait, cela implique d'importants enjeux de sécurité vis-à-vis de la détection, la localisation, l'identification et la traque des drones puisqu'ils peuvent être utilisés pour espionner des sites sensibles et transporter des engins explosifs. Les guerres en Ukraine et au Moyen-Orient montrent l'importance de l'utilisation des drones dans les conflits modernes. La plupart des drones utilisent des hélices pour se mouvoir produisant un effet Micro-Doppler (MD) dépendant des caractéristiques du drone. Le travail présenté dans ce papier s'ancre dans la problématique de l'amélioration des capacités des radars à détecter et identifier des drones en utilisant leur signature Micro-Doppler. Notons que l'effet MD intervient en radar, mais aussi en biologie et en médecine [1]–[3]. Un nombre croissant d'articles sont publiés sur la classification des drones en utilisant le machine et le deep learning sur les signaux reçus [4]–[7]. Toutefois, des recherches sont encore nécessaires sur la modélisation du signal et sa détection par un

radar. Dans ce papier, nous proposons l'étude de la signature Micro-Doppler des drones. Pour ce faire, nous proposons une modélisation fine du signal reçu par un radar. Dans ce contexte, nous adoptons le modèle de Chen pour générer le signal afin de déterminer les paramètres critiques, utiles à la détection de drones [1], [2]. Le signal généré est interprété via des analyses en temps-fréquence. Le contenu de ce papier est divisé en trois sections. La section II explique la génération du signal MD en donnant l'exemple du signal d'un hélicoptère. La section III donne les résultats de la simulation du signal MD d'un drone quadricoptère. Le papier se termine par une conclusion est donnée en section IV.

II. SIGNATURE MICRO-DOPPLER D'UN OBJET

Le phénomène Doppler est une modulation de la fréquence causée par le mouvement relatif d'un objet par rapport à un radar. En théorie du radar, on utilise l'effet Doppler pour estimer la vitesse relative d'une cible par rapport au radar. De manière similaire, le phénomène Micro-Doppler est une modulation de la fréquence causée par des mouvements oscillatoires des parties mobiles d'un objet.

A. Modélisation de l'effet Micro-Doppler : modèle de Chen

Le modèle de Chen est basé sur l'utilisation de l'optique physique pour générer le signal Micro-Doppler d'un objet ainsi que la fréquence Micro-Doppler f_{mD} [1]. Il consiste à décrire le mouvement des parties mobiles de la cible en utilisant des réflecteurs ponctuels pour estimer le décalage de phase $\phi(t)$ entre l'onde EM (électromagnétique) reçue et l'onde EM émise par le radar. La f_{mD} et le signal sont estimés à partir de la phase $\phi(t)$. Le modèle de Chen repose sur trois hypothèses. D'abord, on utilise une méthode d'optique physique où la longueur d'onde $\lambda \ll a$, avec a la dimension de l'objet (approximation des hautes fréquences). Ensuite, on utilise l'approximation en champ lointain utile dans le contexte radar. Enfin, la réflexion des parties mobiles de l'objet est modélisée par des réflecteurs ponctuels P placés judicieusement. Ces points P sont décrits dans trois systèmes de coordonnées (figure 1) : les coordonnées du radar $(\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$, les coordonnées de référence $(\vec{X}', \vec{Y}', \vec{Z}')$, et les coordonnées locales $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ pour décrire les translations et les rotations. Ce modèle permet d'obtenir des expressions analytiques du signal

MD et de la f_{mD} mais il présente des limites dues à l'utilisation de la méthode d'optique physique qui ne permet pas de prendre en compte des phénomènes critiques dans le calcul de la SER (diffraction, ondes de surface, effet de canal, interactions entre ces phénomènes). Malgré ces limites, ce modèle paramétrable est d'intérêt dans la modélisation des signaux radar.

Par exemple, supposons qu'un radar CW (Continuous Wave) émet un signal $s(t) = S_0 \exp(-j2\pi ft)$ à une distance $R_0 \gg a$, où a est la dimension de l'objet. Sans tenir compte de la forme de l'antenne, le signal reçu est $s_R(t) = \rho(x, y, z) \exp[-j(2\pi ft + \phi(t))]$ où $\rho(x, y, z)$ est la fonction de réflectivité des réflecteurs ponctuels. On suppose qu'un point P sur l'objet est animé d'un micro-mouvement correspondant à une translation de P_0 à P_1 à la vitesse v suivie d'une rotation de P_1 à P_2 autour d'un vecteur $\vec{\omega}$ à la vitesse angulaire $\Omega = \|\vec{\omega}\|$. On obtient la f_{mD} théorique en éq.(1) comme la somme des modulations de fréquences causées par la translation et la rotation [1], [8].

$$f_{\text{mD}} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{2f}{c} \vec{v} \cdot \vec{n} + \frac{2f}{c} (\vec{\omega} \times \vec{r}_1') \cdot \vec{n} \quad (1)$$

Où $\vec{r}_1' = e^{\hat{\omega}t} \vec{r}_1$, \vec{r}_1 est la position de P_1 et $\vec{n} = (\vec{R}_0 + \vec{v}t + R_t \vec{r}_1) / \|\vec{R}_0 + \vec{v}t + R_t \vec{r}_1\|$ la LOS (line-of-sight) du radar. La rotation $R_t = e^{\hat{\omega}t}$ avec la matrice antisymétrique $\hat{\omega}$ est calculée avec $\hat{\omega} \vec{r}_1 = \vec{\omega} \times \vec{r}_1$ et la formule de Rodrigues avec la matrice antisymétrique unitaire $\hat{\omega}'$ [1], [9]. On obtient l'éq.(2).

$$f_{\text{mD}} = \frac{2f}{c} \left[\vec{v} + \frac{d}{dt} (e^{\hat{\omega}t} \vec{r}_1) \right] \cdot \vec{n} \quad (2a)$$

$$= \frac{2f}{c} [\vec{v} + \Omega (\hat{\omega}'^2 \sin(\Omega t) + \hat{\omega}' \cos(\Omega t)) \vec{r}_1] \cdot \vec{n} \quad (2b)$$

L'étude du signal repose sur l'analyse en temps-fréquence avec les transformées de Fourier (TF) et les spectrogrammes pour capturer la variation temporelle rapide du signal due aux mouvements oscillatoires sur la cible. On donne un exemple dans la section II-B.

B. Signature Micro-Doppler d'un hélicoptère

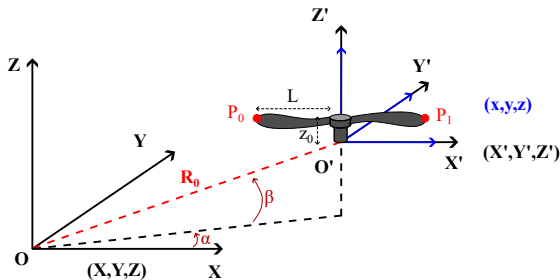


Fig. 1. Système radar-rotor pour modéliser un hélicoptère en vol stationnaire avec des réflecteurs ponctuels P_k en bout de pale.

On simule le signal MD d'un hélicoptère en vol stationnaire sans le cockpit et le rotor arrière se trouvant à $R_0 = 700$ m avec les angles d'azimut $\alpha = 0^\circ$ et d'élévation $\beta = 45^\circ$ dans $(\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ (figure 1). Le radar CW émet un signal

$s(t) = \exp(-j2\pi ft)$ à $f = 5$ GHz qui reprend celle de la référence [1]. Dans ce contexte d'étude, d'autres simulations ont été effectuées, notamment à 10 GHz, et les résultats obtenus sont similaires à ceux donnés à 5 GHz. Le rotor principal de l'hélicoptère a $N = 2$ pales de longueur $L = 6.5$ m pour une largeur de 1 m avec 4 rps (rotations par seconde). Le signal MD est la somme des contributions des N pales modélisées par un ensemble continu de réflecteurs ponctuels parfaits le long de la pale. De ce fait, on ne prend pas en compte la largeur de la pale et on a $\rho(x, y, z) = 1 \forall (x, y, z)$. On obtient l'éq.(3).

$$s_R(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s_{R,k}(t) = L e^{-j2\pi ft} e^{-j\frac{4\pi f}{c}(R_0 + z_0 \sin \beta)}$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} \text{sinc} \left[\frac{4\pi f L}{c} \frac{L}{2} \cos \beta \cos(\alpha - \varphi_{k,t}) \right] e^{-j\frac{4\pi f}{c} \frac{L}{2} \cos \beta \cos(\alpha - \varphi_{k,t})} \quad (3)$$

Où z_0 est la hauteur des pales du rotor et $\varphi_{k,t} = \varphi_0 + 2\pi k/N \pm \Omega t$, avec la vitesse angulaire Ω . Avec l'éq.(3), on obtient les figures 2, 3 et 4. En figure 2, le signal présente

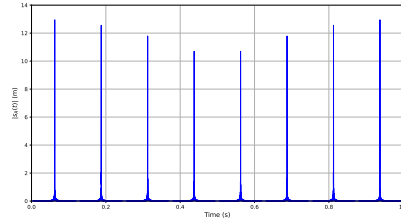


Fig. 2. Signal de l'hélicoptère en vol stationnaire.

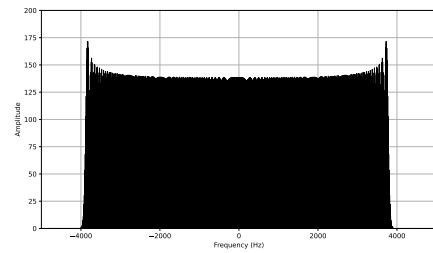


Fig. 3. TF du signal pour l'hélicoptère.

8 pics d'amplitude apparaissant lorsque la LOS du radar est normale aux pales du rotor. En figure 3, le spectre Doppler s'étend sur l'intervalle de fréquences $[-4.0, 4.0]$ kHz centré en zéro avec des extrema d'amplitude sur ses bords. La partie positive des fréquences correspond à la pale se rapprochant du radar et la partie négative à la pale qui s'éloigne du radar. En figure 4, les flashes observés apparaissent lorsque les pales sont normales à la LOS du radar et renvoient la majorité de l'énergie de l'onde incidente. Les sinusoides sur l'intervalle $[-4.0, 4.0]$ kHz correspondent à la modulation de la fréquence causée par la rotation des pales autour de la fréquence Doppler $f_D = 0$ Hz puisque le rotor est stationnaire par rapport au

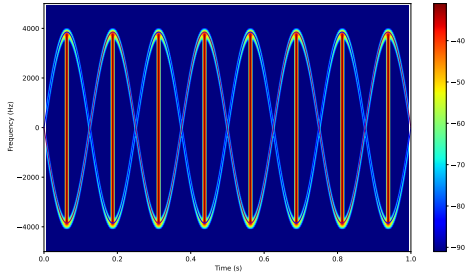


Fig. 4. Spectrogram du signal superposé avec la f_{mD} pour les pales $k = 0$ (ligne bleue) et $k = 1$ (ligne violette).

radar. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans les références [1] et [10]. Les résultats de simulation montrent que la TF donne seulement un intervalle de fréquences alors que le spectrogramme montre clairement la rotation des pales. De plus, le motif du spectrogramme est caractéristique de la vitesse angulaire de rotation, de la longueur des pales, du nombre de pales, et de l'inclinaison des pales. Dans la section III, on présente la simulation dans le cadre d'un UAV.

III. SIMULATION ET RÉSULTATS DE LA SIGNATURE MICRO-DOPPLER D'UN QUADRICOPTÈRE

On considère un quadricoptère étant donné que ce sont les drones les plus répandus. On souhaite déterminer les paramètres critiques modifiant le signal Micro-Doppler et pouvant donner des informations sur les caractéristiques du drone. On simule la signature MD d'un quadricoptère sans son corps en utilisant les mêmes notations et hypothèses qu'en section II. Les dimensions du drone sont plus faibles que celles de l'hélicoptère mais la vitesse angulaire est plus élevée avec 160 rps. Le drone est observé par un radar CW à $f = 10$ GHz. Les pales des rotors sont modélisées par des plaques rectangulaires parfaitement conductrices de $L = 10$ cm par $l = 2.5$ cm. On place les N_r rotors avec les coordonnées polaires de rayon $L_D = 30$ cm avec l'angle $\alpha_{D,r}$. On exprime le signal MD dans l'éq.(4) avec la SER σ de la plaque pour représenter la fonction de réflectivité $\rho(x, y, z)$.

$$s_R(t) = \sum_{r=0}^{N_r-1} \sum_{k=0}^{N-1} \sqrt{\sigma_{k,r}(\theta_i, \varphi_i)} e^{-j2\pi ft} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} A} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} L_D \cos \beta \cos(\alpha - \alpha_{D,r})} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} L \cos \beta \cos(\alpha - \varphi_{k,t})} \quad (4)$$

$\sqrt{\sigma_{k,r}(\theta_i, \varphi_i)}$ est la SER de la pale k du rotor r pour les angles d'élévation et d'azimut (θ_i, φ_i) et $A = R_0 + v_0 t (\cos \beta \cos \beta_v \cos(\alpha - \alpha_v) + \sin \beta \sin \beta_v) + (z_D + z_r) \sin \beta$. La vitesse du drone est $v_0 = 0$ m.s⁻¹ selon (α_v, β_v) . $z_D = 0$ m est la hauteur du rotor dans $(\vec{X}', \vec{Y}', \vec{Z}')$ et $z_r = 0$ m est la hauteur du rotor dans $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$. On obtient le signal en figure 5, la TF en figure 6 et le spectrogramme en figure 7.

En figure 5, le grand nombre de pics d'amplitude est due à la vitesse angulaire plus rapide pour le drone que pour l'hélicoptère. Ces pics sont plus faibles en amplitude dues à la taille plus petite des pales que pour l'hélicoptère (figure 2). En figure 6, le spectre Doppler s'étend sur l'intervalle

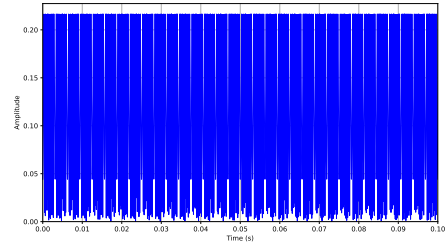


Fig. 5. Signal du quadricoptère reçu par le radar sur 0.1 s.

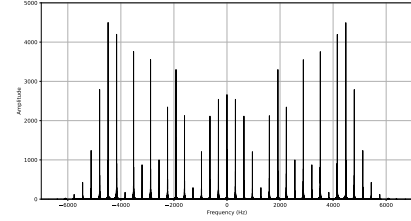


Fig. 6. TF du signal du quadricoptère.

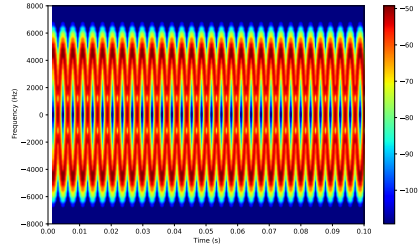


Fig. 7. Spectrogram du signal du quadricoptère reçu par le radar sur 0.1 s.

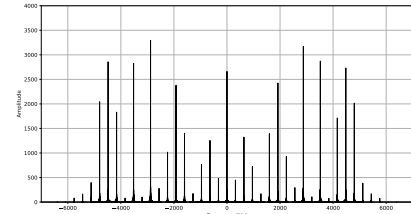


Fig. 8. TF du signal du quadricoptère avec l'ensemble de phases initiales aléatoires des rotors [326, 132, 109, 134] °.

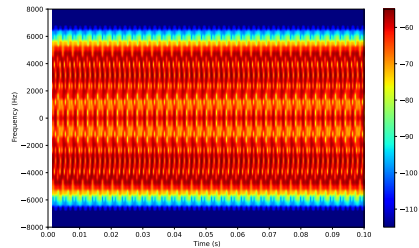


Fig. 9. Spectrogram du signal du quadricoptère avec l'ensemble de phases initiales aléatoires des rotors [326, 132, 109, 134] °.

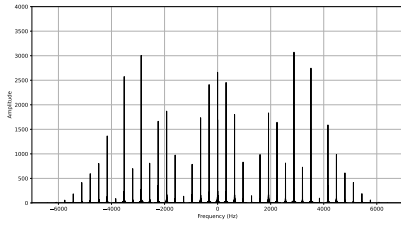


Fig. 10. TF du signal du quadricoptère avec l'ensemble de phases initiales aléatoires des rotors [223, 138, 28, 120] °.

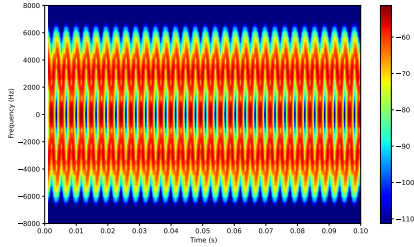


Fig. 11. Spectrogramme du signal du quadricoptère avec l'ensemble de phases initiales aléatoires des rotors [223, 138, 28, 120] °.

[−6.0, 6.0] kHz avec des pics d'amplitude bien séparés et plus grands qu'en figure 3. Le spectre Doppler diffère de celui de l'hélicoptère puisqu'on considère la contribution de 4 rotors à 2 pales. En figure 7, le spectrogramme a des sinusoides similaires à la figure 4 car on a la même phase φ_0 pour tous les rotors ce qui est un cas idéal. On observe plus de sinusoides dues à la vitesse de rotation. De plus, on constate que les flashes disparaissent du spectrogramme lorsqu'on utilise la SER σ qui ne prend pas en compte la réflexion sur toute la longueur de la pale. D'après ces observations, les dimensions de la pale, le nombre de rotors et la vitesse angulaire des pales influencent fortement la signature Micro-Doppler d'un UAV.

Cependant, en pratique chaque rotor a une phase initiale φ_0 différente ce qui modifie la signature Micro-Doppler comme le montrent les figures 8, 9, 10 et 11, pour deux ensembles de phases φ_0 aléatoires : ensemble 1 [326, 132, 109, 134] ° et ensemble 2 [223, 138, 28, 120] °. En figures 8 et 10, on observe le même profil de spectre Doppler mais avec des pics de magnitudes différentes sur l'intervalle de fréquences. En figures 9 et 11, les spectrogrammes ont les mêmes amplitudes de fréquences mais avec des profils très différents. L'intensité des sinusoides diffère entre les figures 7, 9 et 11 à cause des phases initiales aléatoires φ_0 . Cela rend le traitement du signal difficile pour retrouver des informations utiles comme le nombre N_r de rotors et le nombre N de pales. En effet, nous avons un signal à plusieurs composantes contrairement au cas de l'hélicoptère présenté en section II. Toutefois, notons que les simulations présentées ici représentent une configuration simple. En effet, on étudie un drone en vol stationnaire sans corps, sans tenir compte du milieu de propagation et en utilisant une méthode d'optique physique pour la SER des pales. Enfin, nous n'avons pas pris en compte les zones d'ombre lorsque le drone est illuminé par le radar. La poursuite

de ce travail est nécessaire pour obtenir un modèle fiable de génération de signal Micro-Doppler pour les UAV.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce papier, nous avons présenté une étude préliminaire de la signature Micro-Doppler d'un drone quadricoptère en simulant le signal reçu par un radar avec un modèle de réflecteurs ponctuels en utilisant comme référence le signal MD du rotor principal d'un hélicoptère. L'objectif était de mettre en avant les paramètres critiques du modèle qui modifient de manière significative la signature MD rendant difficile le traitement du signal. Les résultats obtenus ont montré que les dimensions des pales, la vitesse angulaire des pales, la phase initiale des pales des rotors, l'utilisation de la fonction de réflectivité et le nombre de rotors ont une influence significative dans l'analyse en temps-fréquence de la signature Micro-Doppler.

Cependant, des phénomènes importants pour le calcul de la SER des pales n'ont pas été pris en compte due à l'utilisation de la méthode d'optique physique dans le modèle. Ainsi, si les simulations présentées montrent clairement l'influence des paramètres critiques, des simulations plus fines sont nécessaires pour représenter de manière fiable la signature Micro-Doppler d'un drone. De surcroît, nous avons également besoin d'outils méthodologiques adaptés pour le volet traitement du signal afin de récupérer toute information utile dans le contexte de la détection de drones.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'AID-DGA (Agence de l'Innovation de Défense - Direction Générale de l'Armement) pour leur soutien.

RÉFÉRENCES

- [1] Victor C. Chen. *The micro-Doppler effect in radar*. Artech House radar series. Artech House, Norwood, MA, second edition edition, 2019. OCLC: on1061818383.
- [2] Dave Tahmoush. Review of micro-Doppler signatures. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 9(9):1140–1146, December 2015.
- [3] Victor C. Chen. Micro-Doppler effect of micromotion dynamics: a review. page 240, Orlando, FL, April 2003.
- [4] Tengmingyang Li, Biyang Wen, Yingwei Tian, Ziyang Li, and Sijie Wang. Numerical Simulation and Experimental Analysis of Small Drone Rotor Blade Polarimetry Based on RCS and Micro-Doppler Signature. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(1):187–191, January 2019.
- [5] Douglas Gray, Brian Ng, and Si Tran Nguyen. Micro-Doppler Power Analysis for Drone Discrimination. In *2023 IEEE International Radar Conference (RADAR)*, pages 1–6, Sydney, Australia, November 2023. IEEE.
- [6] Takafumi Matsuda, Ryoma Yataka, Masato Gocho, and Tai Tanaka. Micro-Doppler Analysis under Various Aspect Angles for Small UAV Classification. In *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, pages 102–104, Singapore, Singapore, December 2019. IEEE.
- [7] Matthew Ritchie, Francesco Fioranelli, Hugh Griffiths, and Borge Torvik. Micro-drone RCS analysis. In *2015 IEEE Radar Conference*, pages 452–456, Johannesburg, South Africa, October 2015. IEEE.
- [8] J. Cooper and C. H. Wilcox. Scattering by moving bodies: The quasi stationary approximation. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2(2):131–148, January 1980.
- [9] Ahmed A. Shabana. *Dynamics of Multibody Systems*. Cambridge University Press, New York, 2005.
- [10] J. Misiurewicz. Analysis of recorded helicopter echo. In *Radar Systems (RADAR 97)*, volume 1997, pages 449–453, Edinburgh, UK, 1997. IEE.