HAL
open science

# Caractérisation et modélisation d'objets par des points brillants: application au radar automobile à 77 GHz

Alain Peden, Emna Bel Kamel, Patrice Pajusco

## To cite this version:

Alain Peden, Emna Bel Kamel, Patrice Pajusco. Caractérisation et modélisation d'objets par des points brillants: application au radar automobile à 77 GHz. JNM 2017: 20èmes Journées Nationales Microondes, May 2017, Saint-Malo, France. hal-01617997

**HAL Id: hal-01617997**

**https://hal.science/hal-01617997v1**

Submitted on 3 Jul 2018

**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.

# Caractérisation et modélisation d'objets par des points brillants : application au radar automobile à 77 GHz

A. Peden, E. Bel Kamel, P. Pajusco

*Lab-STICC, Telecom Bretagne, technopôle Brest-Iroise, CS 83818, 29238 Brest Cedex 3*
*alain.peden@telecom-bretagne.eu*

***Résumé*** *– La modélisation des cibles et de leur environnement est essentielle pour l'optimisation, via une plateforme de simulation par exemple, des systèmes de détection tels que les radars automobiles d'aide à la conduite. A très hautes fréquences, la dimension des objets rend cependant difficile leur prise en compte de manière fine en simulation et la description par une seule valeur de SER n'est pas toujours adéquate. Nous proposons une approche expérimentale en bande W (75-110 GHz), associée à une modélisation des objets à l'aide de points brillants ainsi qu'un algorithme simple de construction d'image 2D sous forme de contour.*

## 1. Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre du développement d'une plateforme de simulation pour l'étude et l'optimisation de systèmes radars automobiles d'aide à la conduite. Dans ce contexte, une description fine des objets (véhicules, piétons,…) et de leur environnement est essentielle mais difficile, en particulier à très hautes fréquences, puisque la prise en compte de la diffusion des cibles via des méthodes de simulation électromagnétique rigoureuses s'avère impossible dans le cas de problèmes électriquement larges. A ces fréquences, les méthodes asymptotiques permettent de simplifier l'approche par l'introduction de points brillants afin d'obtenir en particulier la SER (Surface Equivalente Radar) des cibles [1], [2]. Par ailleurs, la définition classique de la SER impose en général des conditions de champ lointain qui ne sont pas toujours vérifiées en fonctionnement réel du radar.

L'objectif de l'étude présentée dans ce papier est de proposer une méthode de caractérisation expérimentale, inspirée de la technique SAR (Synthetic Aperture Radar) [3], permettant d'extraire une description des objets par des points brillants qui représentent les phénomènes d'interactions entre cet objet et l'onde électromagnétique (diffraction, diffusion, réflexion spéculaire,…). Ce modèle pourra par la suite être utilisé dans une plateforme de simulation orientée radar pour décrire les objets et l'environnement vus par le radar.

Ce papier décrit le modèle de points brillants retenu pour reconstruire une image de la scène ou de l'environnement, associé à un banc de caractérisation en bande W (75-110 GHz). Les résultats obtenus sont illustrés à travers différents objets de petite ou moyenne taille (vélo, moto).

## 2. Modélisation à l'aide de points brillants

### *2.a. Modélisation à l'aide de points brillants*

L'idée est d'utiliser une représentation 2D simple, limitée à un plan, à l'aide de points brillants qui traduisent l'image électromagnétique que celui-ci renvoie à un radar qui l'illumine. L'approche de modélisation par des centres diffusants (ou points brillants) est valide si la longueur d'onde est très petite devant la taille des objets. Le champ électromagnétique rétrodiffusé est alors obtenu par la somme de contributions de centres diffusants électriquement isolés [3], [4]. Le signal $S$ rétrodiffusé, issu d'un point brillant, peut s'écrire alors sous la forme, dans l'hypothèse de champ lointain :

$$S(f) = \alpha \exp\left(-j2k\vec{u}.\vec{r}\right) \qquad (1)$$

où $k = 2\pi f / c$, avec $f$ la fréquence, $c$ la vitesse de propagation, $\alpha$ l'amplitude complexe. $\vec{u}$ est un vecteur unitaire dans la direction du signal rétrodiffusé et $\vec{r}$ le vecteur associé à la position ($x$, $y$) du point dans un plan $xOy$. Le terme $\alpha$ peut également dépendre de la fréquence selon la forme géométrique de base (coin, sphère, cylindre, dièdre,…) mise en jeu lors de l'interaction [3]. L'expression scalaire donnée par (1) indique également que seul le champ copolaire est pris en compte ici.

Afin d'obtenir une image 2D et valider l'approche de description par des points brillants, l'objet assimilé à un ensemble de points brillants est placé au centre d'un cercle le long duquel le signal rétrodiffusé par l'objet est mesuré successivement, de manière statique, par un système d'émission/réception (configuration Tx/Rx mono-statique) déplacé en différentes positions régulièrement espacées. Dans toute la suite, seul le demi-cercle est parcouru comme illustré sur la Figure 1.

Pour une position du système Tx/Rx sur le cercle associée à un angle $\theta$, la contribution de plusieurs points brillants isolés au signal reçu s'écrit, sur la base du modèle donné par (1), comme :

$$S(f,\theta) = \sum_i \alpha_i(\theta) \exp\left(-j2\pi f \tau_i(\theta)\right) \qquad (2)$$

où $\tau_i$ est le temps de retard sur un trajet aller-retour entre le radar et le point brillant $i$. Le temps $\tau_i$ dépend de la

position ($x_i$ , $y_i$) du point $i$ et l'angle $\theta$, et est calculé à partir de la distance $d_i$ donnée par :

$$d_i = \left( \left( x_i + R_0 \cos\theta \right)^2 + \left( y_i + R_0 \sin\theta \right)^2 \right)^{1/2} \qquad (3)$$

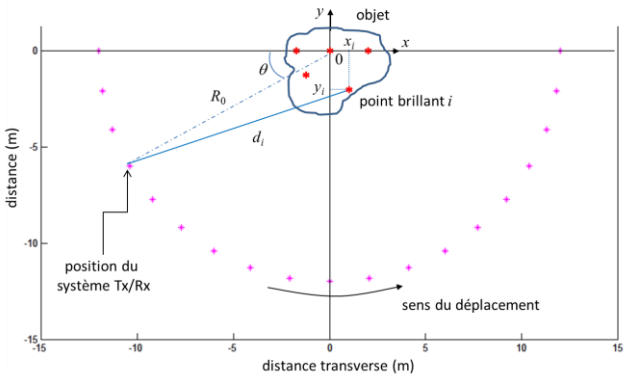



**Figure 1. Configuration de la caractérisation expérimentale**

Dans l'hypothèse de champ lointain ($d_i$ parallèle à $R_0$), le signal s'écrira :

$$S(f,\theta) \simeq \exp\left(-j\frac{4\pi f R_0}{c}\right)\sum_i \alpha_i(\theta)\exp\left(-j\frac{4\pi f}{c}\Delta d_i\right) \qquad (4)$$

avec : $\Delta d_i = x_i \cos\theta + y_i \sin\theta$. Cette expression fait apparaître explicitement le terme de phase lié à la position de chaque point de l'objet dans le plan $xOy$.

L'acquisition du signal pour chaque angle se fait en fonction de la fréquence sur une bande $B$ telle que la résolution en distance, donnée par $c/2B$, soit suffisante pour l'application (3 cm pour $B$=5 GHz). Par transformée de Fourrier inverse (TFI) de $S(f,\theta)$, on obtient la réponse impulsionnelle $h(\tau,\theta) = h_\theta(\tau)$ du canal, où $\tau$ est le retard lié à la distance aller-retour (distance AR). Le rayon du cercle décrit par le radar étant $R_0$ = 12 m, l'objet se trouve en champ lointain des cornets. De même, les objets caractérisés ici étant électriquement isolés et de petite taille, la condition de champ lointain est vérifiée pour le champ reçu par l'antenne. Elle ne sera pas par contre pas vérifiée pour les objets de grande taille. L'évolution en fonction de $\theta$ de la distance AR de différents points brillants obtenue à partir de $h_\theta(\tau)$ est donnée sur la Figure 2 pour différents types de points brillants. La courbe $d(\theta)$ est appelée « trajectoire » [6], et son équation est donnée par (2). Pour un point diffusant supposé isotrope, i.e. visible pour tout $\theta$ avec une intensité constante, la trajectoire est continue. Un point au centre de la scène a une trajectoire constante (point A) et une allure sinusoïdale s'il est décentré (point B). Si on prend en compte le diagramme de rayonnement de l'antenne du système Tx/Rx, la trajectoire disparaît partiellement pour les points en dehors de la zone de couverture de l'antenne comme le montre la Figure 2 (point C). Les phénomènes de réflexion spéculaire se traduisent par contre par une trajectoire très localisée, voire quasi-ponctuelle (point D), du fait que l'onde ne revient dans la direction du radar après réflexion que lorsque la direction de propagation est perpendiculaire à une surface localement plane de l'objet. Cette réflexion n'est donc visible que pour un angle particulier et est modélisée ici par un point appelé ici « spéculaire ». L'intensité de chaque point a été choisie arbitrairement.

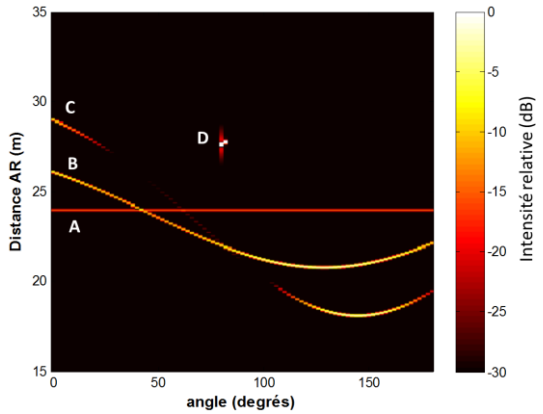



**Figure 2. Trajectoires simulées de trois points diffus A (0;0), B (1;-1,25), C (2,4;-1,7) et spéculaire D (-2;2) (coordonnées en mètres)**

*2.b. Construction d'image à partir des trajectoires*

Un algorithme simple de construction d'une « image » 2D dans le plan $xOy$ à partir des trajectoires a été implémenté. Le principe proposé consiste à construire une grille 2D de pixels (dans le repère de la Figure 1) dont on fixe la résolution à partir de celle de $h_\theta(\tau)$. On calcule alors l'intensité de chaque pixel de la grille à partir de $|h_\theta(\tau)|^2$. Plus précisément, l'intensité d'un pixel $p_i$ à une distance $d_i$, moyennée sur le nombre $N$ de positions parcourues sur le cercle, est calculée en suivant la trajectoire du pixel ($x_i$ ;$y_i$) comme suit :

$$I_{p_i} = \frac{1}{N}\sum_{\theta=1}^{N}\left|h_\theta(\tau_i)\right|^2 = \frac{1}{N}\sum_{\theta=1}^{N}\left|h_\theta(d_i)\right|^2 \qquad (5)$$

où $d_i$ est donnée par (2).

L'image reconstituée sur la Figure 3 pour les points diffus (A, B, C) dont les trajectoires sont données sur la Figure 2 permet de localiser précisément chacun de ces points. On remarque cependant que les points dont la trajectoire n'est pas complète ne sont pas relocalisés en un point mais ont au contraire une image plus étalée. De même, pour le point « spéculaire » visible pour un angle particulier $\theta_0$, associé à la distance $d_0 = d(\theta_0)$, l'image correspondante est un ensemble de pixels répartis selon un arc de cercle. En effet, les trajectoires de tous les points ($x_i$ ;$y_i$) situés à une même distance $d_0$ du système Tx/Rx, c'est-à-dire sur la portion de cercle de rayon $d_0$ (voir Figure 4-a), se croisent en un même point situé à $d_0 = d(\theta_0)$, point pour lequel l'intensité est non nulle.

Tous les pixels situés sur le cercle ont alors une intensité minimale égale à l'intensité du pixel en $d(\theta_0)$ (voir Figure 4-b). L'intensité minimale d'un pixel $p_i$ à une distance $d_i$ telle que $d_i = d_0$ pour $\theta = \theta_0$ est alors donnée par :

$$I_{p_i}^{\min} = \frac{\left|h_{\theta_0}(d_0)\right|^2}{N} \qquad (6)$$

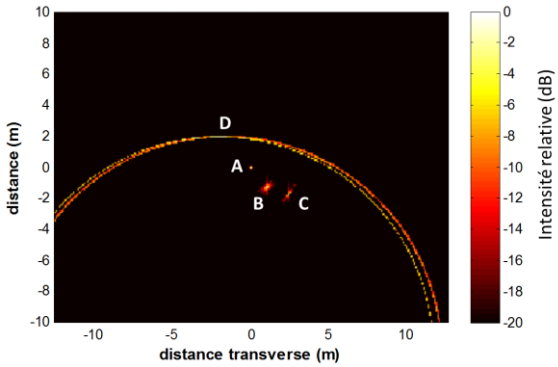
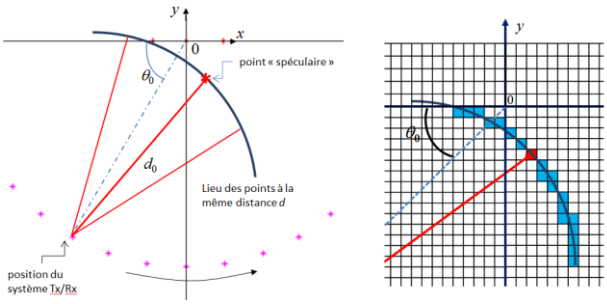



**Figure 3. Image simulée reconstituée des trois points brillants diffus et du point brillant « spéculaire »**




(a) (b)

**Figure 4. Réflexion spéculaire pour $\theta = \theta_0$ : a) points sur le cercle situés à la distance $d_0$, b) intensité des pixels calculée à partir de leurs trajectoires qui se croisent toutes en $d = d_0$ pour $\theta = \theta_0$**

Notons enfin que lorsque des trajectoires se croisent, l'intensité du pixel, telle qu'elle est calculée par (5), peut être fortement surestimée, en particulier s'il s'agit de la trajectoire d'un pixel correspondant à un objet très faiblement diffusant, voire à aucun objet de la scène, croisant celle d'un pixel dont l'intensité est importante. Pour atténuer cet effet, l'intensité de chaque pixel peut être calculée en prenant la valeur médiane de cinq valeurs successives sur la trajectoire. Cependant, ceci a pour conséquence de nettoyer l'image, en particulier dans le cas illustré à la Figure 4 où l'arc de cercle sera supprimé puisque la trajectoire contient peu de points.

## 3. Validation expérimentale de l'approche de modélisation par des points brillants

### *3.a. Configuration du banc de caractérisation*

La validation expérimentale de cette approche a été effectuée sur des objets simples de petites et moyennes dimensions dans un gymnase. Le système de mesure est celui présenté en [7]. La bande de fréquence est de 5 GHz autour de 78,5 GHz avec 2048 points, ce qui correspond dans le domaine temporel à un retard maximal AR de 0.41 µs, soit une distance AR maximale de 120 m environ. Pour les caractérisations dans le gymnase, le système de mesure est positionné sur une table roulante déplacée manuellement. Les antennes cornets se situent à environ 70 cm du sol. Comme on l'a vu précédemment, on ne s'intéresse ici qu'au module de $h_\theta(\tau)$ puisque les mesures sont réalisées de manière statique d'une position à l'autre sur le cercle (rayon de 12 m), par pas de 2°. Le déplacement manuel du système Tx/Rx ne permet pas de garder une cohérence de phase d'un point à l'autre car la trajectoire le long du cercle est approximative, compte tenu de la longueur d'onde de 4 mm à 77 GHz.

### *3.b. Mesure de cinq canettes posées sur le sol*

La Figure 5 montre la configuration de mesure de cinq canettes cylindriques métalliques posées sur le sol. Le diamètre des canettes 1 et 3 est $\phi = 6{,}5$ cm, pour une hauteur $h = 12$ cm, celui des canettes 2 et 5 est $\phi = 10$ cm pour $h = 12$ cm, et pour la canette 4, $\phi = 5{,}5$ cm et $h = 14{,}5$ cm. Cet exemple permet d'illustrer la notion de points brillants diffus et de trajectoires associées. Les objets sont de forme cylindrique et rétrodiffusent de l'énergie dans la direction du radar quel que soit l'angle $\theta$, mais leur position au sol ne les rend pas visible pour tout $\theta$ compte-tenu de la zone de couverture des antennes utilisées. La comparaison des trajectoires obtenues en simulation et en mesure montre une très bonne concordance (voir Figure 6).

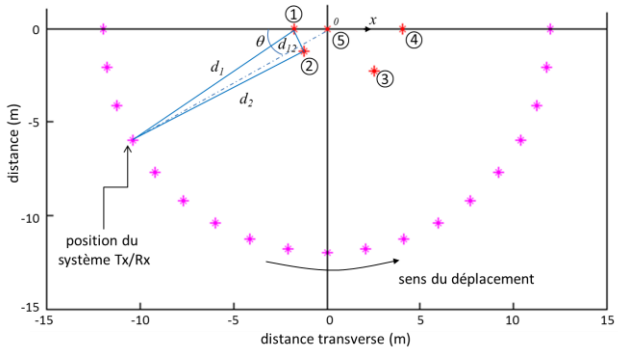



**Figure 5. Configuration de mesure de 5 canettes et interaction entre les canettes 1 et 2**

On observe également en mesure des trajectoires complémentaires et d'intensité beaucoup plus faible (Figure 6-a). Elles ont été mises en évidence en simulation (Figure 6-b) en tenant compte d'une interaction entre les canettes 1-2, 1-5 et 2-5 par le biais de trajets issus de la réflexion d'une canette sur une autre, comme par exemple pour l'interaction des canettes 1-2 dont le trajet AR du signal est donné par : $d(\theta) = d_1(\theta) + d_2(\theta) + d_{12}$ (voir Figure 5). Les canettes 3 et 4 ne sont pas en interaction entre elles ou avec les autres du fait de leur position respective et moins couvertes par les antennes. L'image reconstruite à partir des réponses mesurées est donnée sur la Figure 8. L'effet des interactions n'est pas visible sur l'image compte-tenu de l'échelle des amplitudes. Les trajectoires associées correspondent à une distance équivalente pour laquelle il n'existe pas de point brillant localisé. Cela se traduira sur l'image, si le phénomène est visible, par une forme distribuée en arc de cercle dont la justification rejoint celle liée au point « spéculaire ».

L'image reconstituée à partir des trajectoires mesurées et simulées est donnée sur la Figure 7. Les points les mieux reconstruits correspondent aux

trajectoires les plus complètes, et ce, d'autant plus s'il s'agit de points brillants d'intensité très faible.

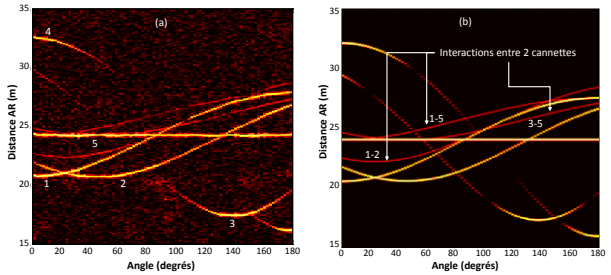



**Figure 6. Trajectoires pour 5 canettes métalliques posées au sol : a) mesure, b) simulation**

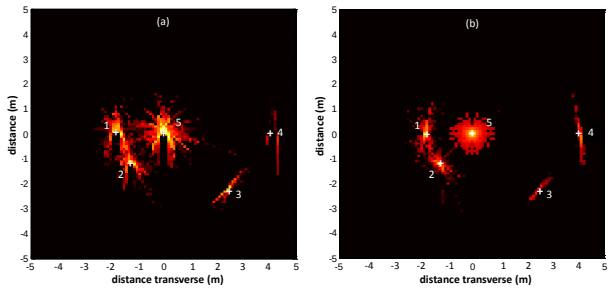



**Figure 7. Image simulée reconstruite des 5 canettes : a) mesure, b) simulation**

*3.c. Mesure d'une sphère*

Une sphère centrée et maintenue par des fils reliés à quatre poteaux métalliques a été mesurée (voir Figure 8).

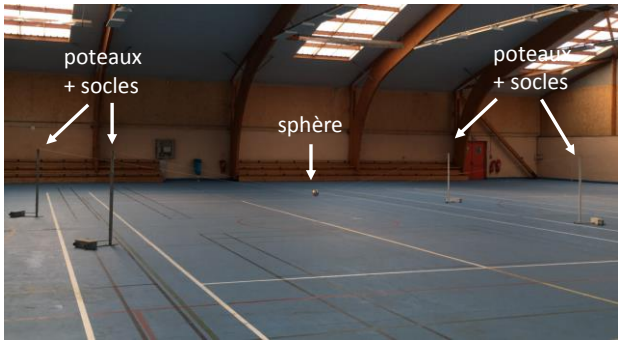



**Figure 8. Sphère soutenue par des fils à 4 poteaux**

Chaque poteau de section carrée est représenté par un point brillant diffus et chaque face de la section par une réflexion spéculaire. Le socle est également pris en compte par deux points diffus. La Figure 9 montre l'image de la scène reconstruite à partir des mesures et de la simulation.

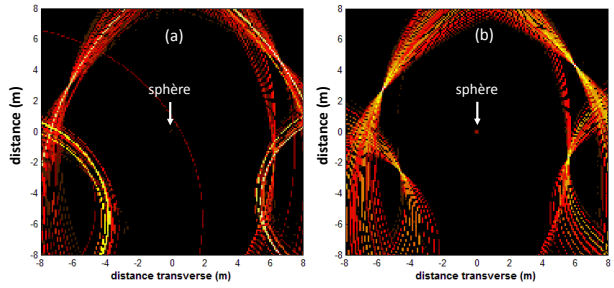



**Figure 9. Image reconstruite de la sphère et des 4 poteaux : a) mesure, b) simulation**

*3.d. Mesure de différents objets*

La comparaison des mesures et des simulations montre qu'il est possible d'utiliser, pour chaque situation, l'approche basée sur des points brillants afin de modéliser les objets et l'environnement, y compris des objets de grande taille. La figure 10 donne l'image (contour) d'une moto. D'autres exemples seront présentés lors de la conférence, dont des véhicules [7].

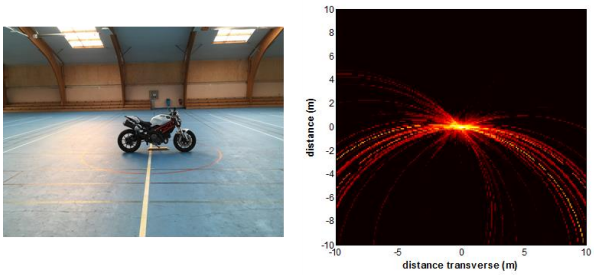



**Figure 10. Image reconstruite d'une moto**

## 4. Conclusion

Un modèle de points brillants a été présenté et validé expérimentalement en bande W ainsi qu'un algorithme utilisant les trajectoires associées pour reconstruire une image 2D des différents scénarios. L'image obtenue, limitée à son contour, permet de positionner précisément les objets de la scène.

Les perspectives concernent l'identification des points brillants les plus représentatifs ainsi que leur calibrage en amplitude selon l'angle de vue. Cette approche de modélisation des objets pourra par la suite être utilisée dans une plateforme de simulation de scénarios routiers.

## Références

[1] J. B. Keller, 'Geometrical theory of diffraction', J. *Opt. Soc. Amer.*, vol. 52, pp.116–130, 1962.

[2] K. Schuler, D. Becker, and W. Wiesbeck, 'Extraction of virtual scattering centers of vehicles by ray-tracing simulations', *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 11, pp. 3543–3551, 2008.

[3] C. Özdemir, 'Inverse Synthetic Aperture RADAR Imaging with MATLAB Algorithms', pp. 79–183, Ed. John Wiley & Sons, 2012

[4] M. J. Gerry, I. J. Gupta, A. van der Merwe, 'A Parametric Model for Synthetic Aperture Radar Measurements', *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, no. 7, pp. 1179-1188, July 1999

[5] Lee C. Potter, R. L. Moses, 'Attributed Scattering Centers for SAR ATR', *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 6, no. 1, pp. 79–91, Jan. 1997

[6] Y. Dai, E. J. Rothwell, K. M. Chen, D. P. Nyquist, 'Time-Domain Imaging of Radar Targets Using Sinogram Restoration for Limited-View Reconstruction', *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, no. 8, pp. 1323-1329, Aug. 1999.

[7] E. Bel Kamel, A. Peden, P. Pajusco, 'Mesure et caractérisation de cibles radar à 77 GHz', *20èmes Journées Nationales Microondes*, Saint-Malo, Mai 2017