



HAL
open science

Radar OAM pour l'identification de symétries de rotation sur une cible

C. Brousseau, K. Mahdjoubi, O. Emile, W. Wei

► **To cite this version:**

C. Brousseau, K. Mahdjoubi, O. Emile, W. Wei. Radar OAM pour l'identification de symétries de rotation sur une cible. XXèmes Journées Nationales Microondes, May 2017, Saint Malo, France. hal-01894294

HAL Id: hal-01894294

<https://hal.science/hal-01894294v1>

Submitted on 12 Oct 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.

Radar OAM pour l'identification de symétries de rotation sur une cible

C. Brousseau¹, K. Mahdjoubi¹, O. Emile², W. Wei¹

¹IETR - Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex

²Laboratoire de Physique des Lasers, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex
christian.brousseau@univ-rennes1.fr

Résumé – Dans cette communication, les premières expérimentations d'un radar utilisant le moment angulaire orbital (OAM) des ondes électromagnétiques sont présentées. Les résultats issus de mesures mettent en évidence les potentialités et les limitations de telles ondes pour estimer des symétries de rotation sur des cibles.

1. Introduction

Une onde électromagnétique (EM) est définie par son amplitude, son vecteur d'onde, sa fréquence et son moment angulaire. Ce dernier peut être décomposé en deux parties [1] : le moment angulaire de spin associé à la polarisation, et le moment angulaire orbital (OAM) qui est associé à la distribution spatiale de la phase du champ électrique.

Ainsi, une onde EM ayant un OAM est caractérisée par une dépendance azimutale de la phase notée $e^{-j\ell\theta}$, où ℓ , l'ordre de l'OAM correspond au nombre de rotation de la phase sur un plan perpendiculaire à la direction de propagation, et θ , à l'angle de roulis. Le faisceau de l'onde ainsi générée a donc la forme très particulière d'un vortex avec un minimum en son centre et une rotation de phase sur sa corolle [2]. Alors que la polarisation ne possède que 2 états, chaque mode d'OAM est associé à un nombre entier ℓ peut théoriquement prendre une infinité de valeurs. Tous ces modes sont orthogonaux entre eux et sont indépendants de la polarisation.

L'utilisation de ce type d'onde peut donc avoir un intérêt dans le domaine des communications et dans notre cas, des radars. Elle apporte une nouvelle diversité permettant d'obtenir des informations de symétrie sur des cibles pour aider à leur identification.

L'objectif de cette communication est de présenter les premières expérimentations en chambre anéchoïque avec un radar utilisant des ondes OAM. Le système radar est d'abord détaillé, notamment le réseau circulaire d'antennes permettant de générer une onde avec un OAM d'ordre $\ell = -1$. Puis, des mesures réalisées à l'aide de 2 réseaux d'antennes d'émission de diamètres différents seront décrites. A partir de cela, la déformation de phase du front d'onde apportée par la cible, est déterminée. Ceci permet d'estimer, dans des situations précises, des symétries de rotation sur l'objet. Enfin, la capacité d'identification de cibles de ce type d'onde est discutée en

regard de la forme et des caractéristiques très particulières des faisceaux émis.

2. Description du radar OAM

De précédents tests ont déjà été effectués sur la capacité de ces ondes, à apporter des informations sur la géométrie de cibles canoniques [3]. Mais, ces tests ont été effectués uniquement en optique et dans une configuration bistatique, c'est-à-dire en transmission. A ce jour et à notre connaissance, aucun test n'a été effectué en bande radio et dans la configuration d'un radar monostatique. L'architecture de ce radar est présentée sur la figure 1.

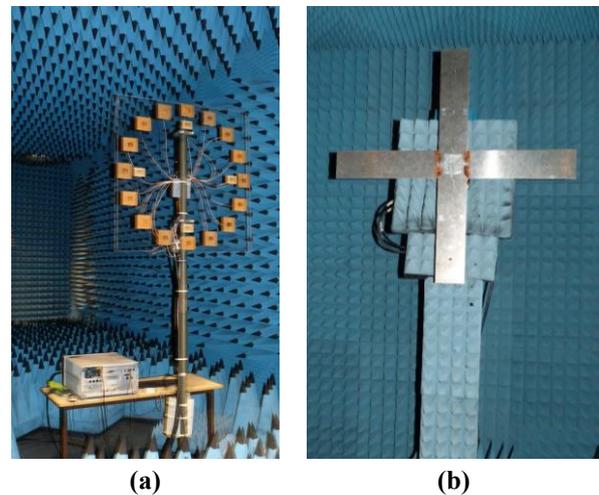


Figure 1. Vue du radar OAM (a) et d'une cible (b) (croix à 4 branches, longueur = 0,5 m, largeur = $1 \times \lambda$)

Ce système est basé sur l'utilisation d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) fonctionnant à la fréquence de 2,5 GHz. Il utilise à l'émission, un réseau phasé de 4 antennes patch émettant en polarisation verticale. Chaque antenne est alimentée avec le même signal mais avec un déphasage d'une antenne à l'autre de $-\pi/2$ radians, soit un déphasage total sur la circonférence du cercle du réseau de -2π radians, générant une onde avec un OAM d'ordre $\ell = -1$ [4].

La Figure 2 présente le diagramme de rayonnement en amplitude et en phase, d'un réseau d'antennes d'émission de 10 cm de diamètre.

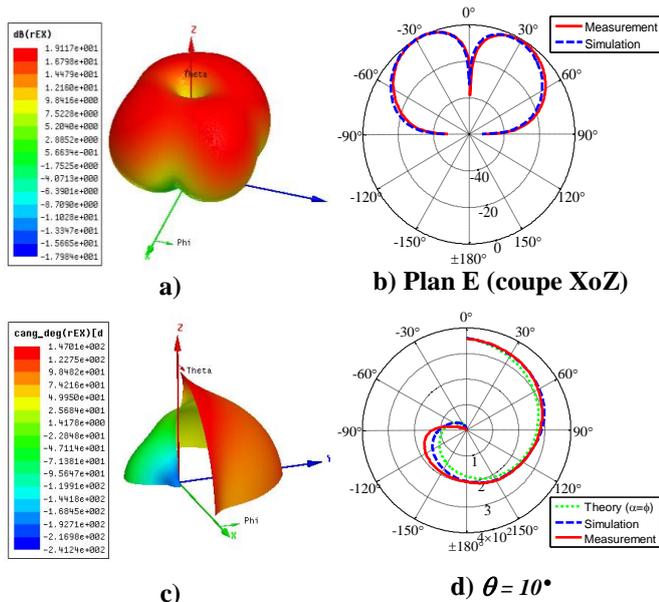


Figure 2. Diagrammes de rayonnement en amplitude et en phase, simulés et mesurés, à la fréquence de 2.5 GHz - Réseau circulaire de 4 antennes patch, de diamètre 10 cm [4].

A la réception, un réseau de 90 cm de diamètre et constitué de 16 antennes patch, est relié au port d'entrée du VNA via un commutateur (Figures 1a). 16 paramètres complexes S21 sont successivement mesurés entre l'antenne d'émission et les antennes de réception.

A partir de ces valeurs, la rotation de phase mesurée sur le front d'onde reçu est extraite, et ensuite l'ordre de l'OAM de l'onde réfléchi par la cible est estimé à l'aide d'une transformée de Fourier de la variation de phase mesurée sur 16 antennes, vers le spectre des modes OAM.

Deux configurations ont été testées pour le réseau circulaire de 4 patchs d'émission OAM : un réseau de diamètre 10 cm, présentant de faibles lobes secondaires mais ayant une divergence du faisceau importante [4] ; un réseau de 70 cm de diamètre ayant une divergence plus faible pour le faisceau, mais avec des remontées de lobes secondaires importantes.

3. Exemples de résultats obtenus

3.a. Méthodologie

Les mesures ont été effectuées en chambre anéchoïque, sur différents types de cibles (plaque, disque, croix à 4 branches) (Figure 1b) pour des distances allant de 1 à 4 m, par pas de 0,5 m.

Après la calibration électronique du VNA, une mesure des 16 paramètres S21 a été réalisée à vide, c'est-à-dire sans cible, pour quantifier les effets de couplage entre l'antenne d'émission et le réseau de réception, ainsi que les échos de la chambre.

Afin de valider le banc de mesure, une première expérimentation est réalisée sur un disque métallique de 1 m de diamètre, placé à 3 m de distance et dans l'axe du radar, en utilisant le réseau d'émission de 70 cm de diamètre.

Les figures suivantes présentent l'amplitude et la phase des 16 valeurs S21 « brutes » (Figure 3.a), puis le résultat obtenu après soustraction de la mesure à vide de la chambre anéchoïque (Figure 3.b).

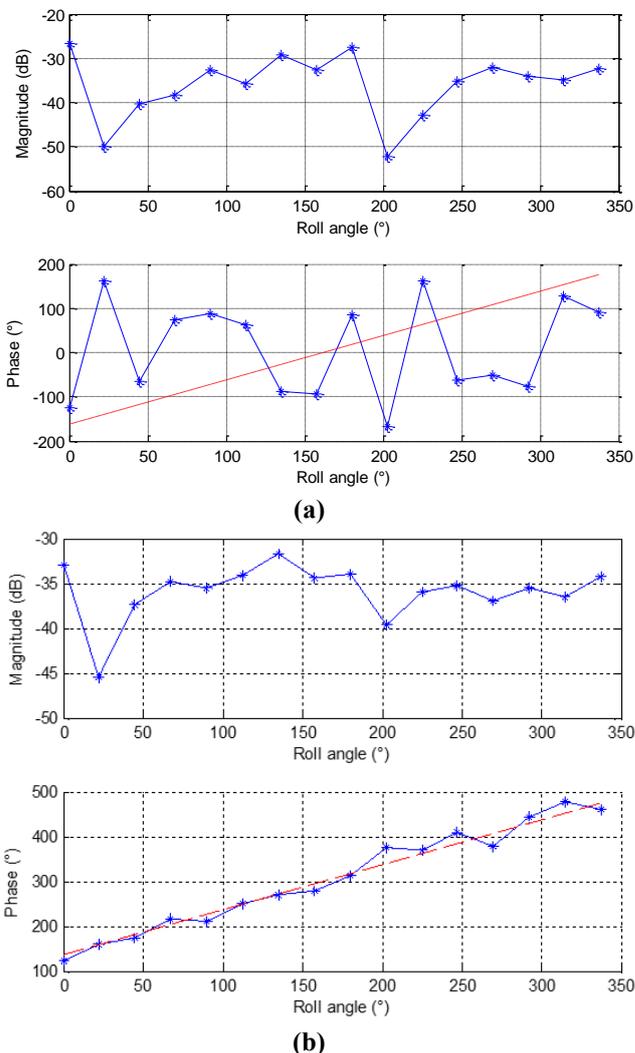


Figure 3. Amplitude et phase du champ réfléchi par un disque métallique de 1 m de diamètre, placé à 3 m de distance, dans l'axe du radar (a) - Amplitude et phase du champ réfléchi après soustraction de la chambre à vide (b) - Fréquence = 2.5 GHz

La Figure 4 présente l'estimation des ordres d'OAM correspondant aux mesures de phase pour la cible seule (après soustraction des échos de la chambre).

On observe que l'ordre d'OAM de l'onde reçue (réfléchi par la cible) est $\ell = +1$, c'est-à-dire l'inverse (le conjugué) de l'ordre de l'onde émise, comme attendu, ce qui nous permet de valider le banc de mesure.

Des ordres d'OAM secondaires très faibles apparaissent. Ils sont principalement dus au « bruit de quantification » lié au réseau de réception et aux non-linéarités de la phase émise (Figure 3.d).

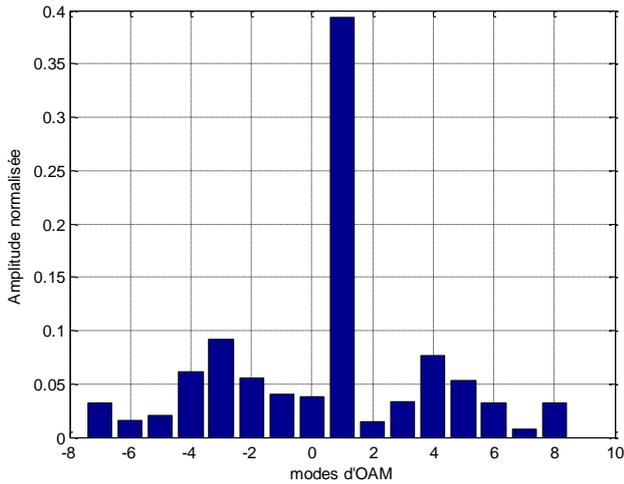


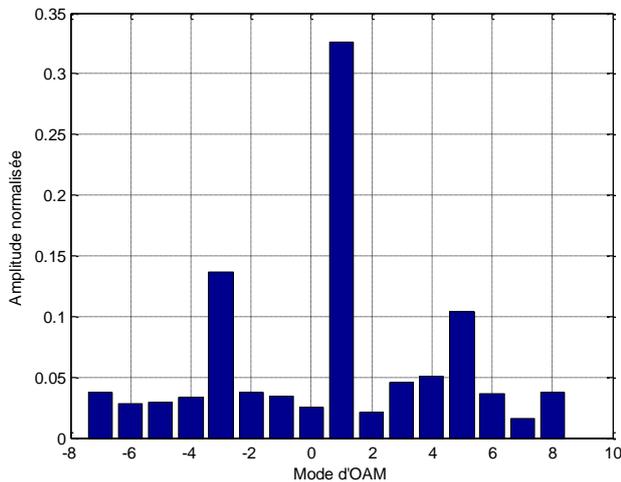
Figure 4. Estimation des ordres d'OAM du champ réfléchi par un disque métallique de 1 m de diamètre, placé à 2 m de distance, dans l'axe du radar (diamètre du réseau d'émission = 10 cm, fréquence = 2.5 GHz).

3.b. Résultats expérimentaux

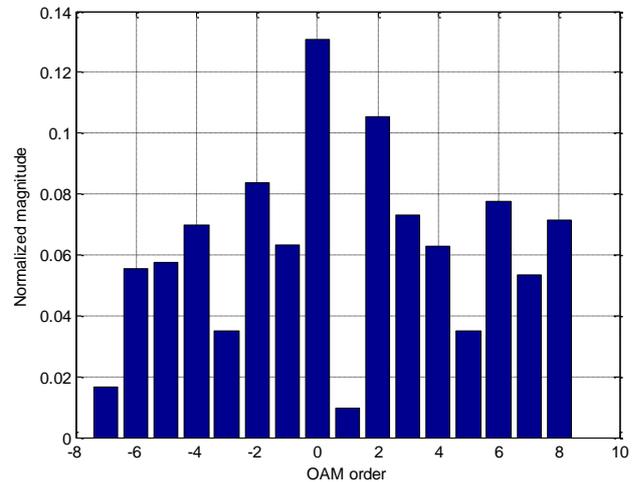
Les graphes de la Figure 5 présentent l'estimation des modes d'OAM obtenue à partir de la mesure de la phase du champ réfléchi par une croix constituée de 4 branches, chaque branche ayant une longueur de 0,5 m et de largeur 12 cm ($1 \times \lambda$), placée à 1 m et 3 m du radar.

L'analyse des graphes montre un mode fondamental majoritaire ($\ell = +1$) correspondant au conjugué du mode émis, et des modes d'OAM secondaires importants pour les valeurs de $\ell = +5$ et $\ell = -3$, à la distance de 1 m pour un diamètre du réseau d'émission de 10 cm (Figure 5.a), et à la distance de 3 m pour un diamètre de réseau de 70 cm (Figure 5.c). L'écartement entre les modes secondaires et le mode principal est égal à ± 4 , ce qui correspond au nombre de branches constituant la croix.

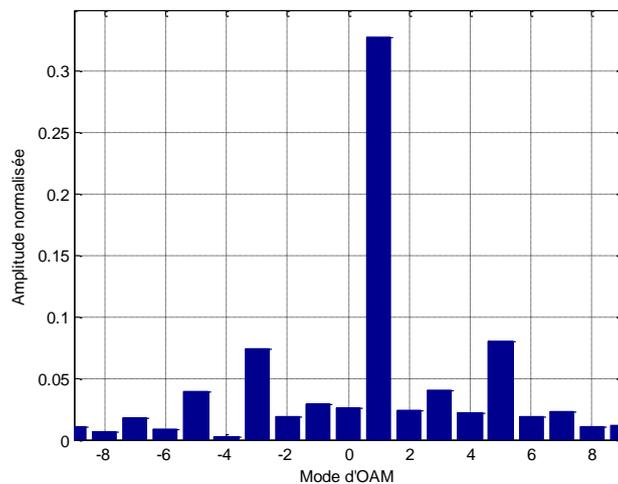
A l'inverse, on remarque aussi que les résultats obtenus pour la distance de 3 m, pour respectivement, un diamètre de réseau de 10 cm (Figure 3.b) ne permette de tirer aucune conclusion sur la géométrie de la cible.



(a) Diamètre = 10 cm, Distance = 1 m



(b) Diamètre = 10 cm, Distance = 3 m



(c) Diamètre = 70 cm, Distance = 3 m

Figure 5. Estimation des ordres d'OAM de l'onde réfléchi par une croix à 4 branches (Figure 1.b), de longueur 0,5 m et de largeur 12 cm ($1 \times \lambda$), placée aux distances de 1 m et 3 m, pour 2 diamètres de réseau (10 cm et 70 cm) - Fréquence de 2.5 GHz

3.c. Discussion

L'analyse des graphes de la Figure 5 montre l'apport de l'OAM pour déterminer des symétries de rotation sur des cibles statiques. Mais, cette capacité n'est pas présente pour toutes les distances.

Dans le cas illustré de la Figure 6, pour un réseau d'émission de 10 cm de diamètre, la détermination du nombre de branches de la croix est possible pour les distances les plus faibles et impossible lorsque la distance augmente. A l'inverse, pour le réseau d'émission de 70 cm de diamètre, la détermination du nombre de branches ne fonctionne que pour la plus grande distance. Ce phénomène peut s'expliquer par la divergence du faisceau qui augmente lorsque le diamètre du réseau diminue. Ce qui justifie que l'estimation des modes à la distance de 3 m et pour le réseau de 10 cm de diamètre, ne donne aucune information. A l'inverse, pour le réseau de 70 cm de diamètre, lorsque la distance radar – cible est trop faible (dans notre cas, 1 m), le faisceau n'est pas suffisamment formé pour que la rotation de phase puisse être considérée comme linéaire en fonction de l'angle de roulis.

Enfin, une caractéristique des faisceaux d'OAM est que leur divergence augmente avec l'ordre, ce qui, dans le cas de la radio, induit des bilans de puissance différents pour chaque ordre d'OAM [6]. La figure 6 présente les bilans pour un réseau de diamètre 10 cm. On constate, par exemple, que pour la distance de 3 m et un diamètre du réseau d'émission de 10 cm, une différence d'environ 80 dB entre les modes $\ell = 0$ et $\ell = 4$, permettant de justifier la difficulté d'estimer des modes d'OAM d'ordre 4.

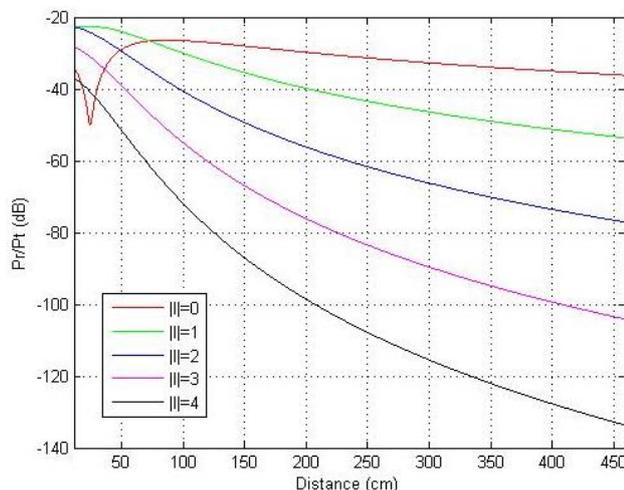


Figure 6. Bilan de puissance pour les modes d'OAM $\ell = 1$ à 4, en fonction de la distance pour un diamètre du réseau de réception de 90 cm et des diamètres du réseau d'émission de 10 cm – Fréquence = 2.5 GHz

4. Conclusion

Dans cette communication, les 1^{ères} expérimentations réalisées sur des cibles statiques à la fréquence de 2,5 GHz, en chambre anéchoïque, par un radar utilisant des ondes ayant un moment angulaire orbital (OAM), sont présentées.

Les résultats montrent les possibilités de ce type de système pour estimer des symétries de rotation sur des cibles, en déterminant les ordres d'OAM de l'onde réfléchie. Mais, du fait des caractéristiques du faisceau OAM généré et de sa divergence, cette capacité n'est opérationnelle que pour certaines distances. Des travaux doivent donc être encore menés afin de générer des faisceaux d'ondes OAM plus directifs.

Références

- [1] J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, Wiley, 1998.
- [2] L. Allen et al., *Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes*, Phys. Rev. A, vol. 45, no. 11, Jun. 1992.
- [3] C.A. Fitzpatrick et al., *High-capacity imaging and rotationally insensitive object identification with correlated orbital angular momentum states*, Int. Journal of Quantum Information, 1560013, 2015.
- [4] W. L. Wei et al., *Generation of OAM waves with circular phase shifter and array of patch antennas*, IET Electronics Letters, 2015.
- [5] E. Yao, S. Franke-Arnold, J. Courtial, S. Barnett, and M. Padgett, *Fourier relationship between angular position and optical orbital angular momentum*, Opt. Express, vol. 14, no. 20, pp. 9071–9076, Oct. 2006.
- [6] D.K. Nguyen et al., *Antenna gain and link budget for waves carrying orbital angular momentum*, Radio Science, Nov. 2015.