



Caractérisation des modes de moment angulaire orbital d'une antenne en ondes millimétriques

Characterization of the orbital angular momentum modes of a mm-wave Antenna

R. Niemiec^{*,**}, C. Brousseau^{*}, K. Mahdjoubi^{*}, O. Emile^{**} and A. Ménard^{***}

^{*}IETR – Institut d'Électronique et de Télécommunications de Rennes, UMR 6164, Université de Rennes 1, France

^{**}LPL – Laboratoire de Physique des Lasers, URU 435, Université de Rennes 1, France

^{***}MSE – Maîtrise des Signatures Électromagnétiques, DGA-MI, Bruz, France

ronan.niemiec@univ-rennes1.fr

Mots clés : Moment angulaire orbital; ondes millimétriques; OAM

Keywords: Orbital angular momentum; millimeter waves; OAM

Introduction

L'utilisation d'ondes électromagnétiques (EM) transportant du moment angulaire orbital (OAM) dans le domaine radio est un sujet en plein essor [1-3]. Il se pose alors le problème de la création d'antennes capables de générer de telles ondes, ainsi que de les recevoir et d'en extraire l'information de phase. Une onde EM portant de l'OAM est caractérisée par une dépendance azimutale de sa phase notée $e^{-jl\theta}$, avec l un entier appelé charge topologique et correspondant au nombre de rotation de la phase par longueur d'onde, et θ , l'angle de roulis.

Dans [4], une nouvelle antenne a été présentée. Elle utilise une lame de phase plate à permittivité variable selon l'angle θ , qui est illuminée par une onde plane, pour générer une onde EM portant de l'OAM. Nous présentons maintenant la caractérisation en espace libre et dans la bande 28-40 GHz de cette antenne, générant une onde EM portant de l'OAM d'ordre $l = 1$.

1. lame de phase plate à permittivité variable selon l'angle θ

La lame de phase [4] est constituée de plusieurs sous-lames dans lesquelles des trous ont été percés pour contrôler la permittivité ϵ_r , exprimée par la relation suivante :

$$\epsilon_r(\theta) = n^2(\theta) = [l\lambda/L (\theta/2\pi - 1) + \sqrt{\epsilon_{host}}]^2, \quad (1)$$

avec L , l'épaisseur de la lame, ϵ_{host} , la permittivité du matériau brut (ici, du Téflon), λ , la longueur d'onde, et l , charge topologique. Une présentation théorique plus poussée de la conception de cette lame de phase est disponible dans [4].

2. Configuration expérimentale

Les mesures ont été effectuées dans la chambre anéchoïque CHEOPS de la DGA-MI (Bruz – 35). Un analyseur de réseau vectoriel génère une rampe de fréquence allant de 28 GHz à 40 GHz, avec un pas de 10 MHz. Une attention particulière a été apportée à la précision de la mesure de la phase, qui a été estimée à environ ± 2.5 degrés.

L'antenne de réception est une antenne cornet conventionnelle, adaptée dans la bande considérée, et située derrière la lame de phase. L'ensemble tourne autour de son axe avec un pas de 10 degrés (angle de roulis θ). Le cornet à l'émission se déplace verticalement le long d'un mât. Les mesures ont été effectuées avec un pas irrégulier en site φ ($0^\circ, 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ and 29°), donnant des cercles concentriques dont les points sont déterminés par les coordonnées ($\varphi ; \theta$). Les champs sont alors reconstruits grâce à la formule classique de copolarisation. Les points manquants nécessaires pour obtenir un pas en site de 1 degré sont ensuite obtenus par interpolation.

3. Résultats expérimentaux et détermination du mode d'OAM

Un exemple de résultat est présenté à la Figure 1, pour une fréquence $f = 32$ GHz. La partie gauche montre la directivité du faisceau. La forme spécifique en "donut" de la zone de forte intensité et la zone de faible intensité (liée au vortex) sont toutes les deux bien visibles. La partie droite montre la distribution de phase du faisceau. Une rotation de phase de θ à 2π est obtenue et correspond à un mode d'OAM $l = 1$.

L'étape suivante est la détermination de la pureté de ce mode. Elle a été calculée en extrayant la phase le long d'un cercle d'ouverture fixée. La décomposition en mode propre d'OAM est alors obtenue directement grâce à une transformée de Fourier, suivant l'équation (2) où φ_l représente la distribution de moment angulaire, et $\psi(\theta)$, la valeur de la phase en fonction de l'angle θ [5]:

$$\varphi_l = (1/2\pi) \int_{-\pi}^{+\pi} d\theta \psi(\theta) \exp(-jl\theta). \tag{2}$$

La Figure 2 montre la décomposition correspondant à 3 cercles centrés sur le vortex mais d'ouvertures différentes : 5 degrés (à gauche), 10 degrés (au milieu) et 15 degrés (à droite). Bien que le mode $l = 1$ reste toujours dominant, la décomposition obtenue est à chaque fois différente, et montre bien la nécessité d'une bonne connaissance de la direction de visée du faisceau.

Conclusion

Une antenne utilisant une lentille de phase plate a été réalisée pour générer une onde portant un ordre d'OAM égale à 1, autour de la fréquence de 30 GHz. La mesure a permis de mettre en évidence la qualité de la lentille réalisée. Les modes générés ont été estimés pour différents cercles d'extraction de la phase. Cette estimation a montré l'importance du positionnement du cercle de mesure lors de cette détermination.

Ce travail a pu être réalisé grâce au soutien de l'Université de Rennes 1, de la Direction Générale de l'Armement (DGA) et de la Région Bretagne. Les auteurs remercient O. Labalette, D. Morin and E. Martineau pour les mesures réalisées dans la chambre CHEOPS (DGA-MI), L. Le Coq pour son aide technique, et C. Guillon pour la réalisation de la lame de phase.

Références bibliographiques

[1] B. Thidé, H. Then, J. Sjöholm, K. Palmer, J. Bergman, T. D. Carozzi, Ya. N. Istomin, N. H. Ibragimov, and R. Khamitova, "Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain", Physical Review Letters, 99, 087701, 2007.

[2] G. S. M. Mohammadi, L. Daldorff, J. Bergman, R. Karlsson, B. Thidé, K. Forozesh, T. Carozzi and B. Isham, "Orbital Angular Momentum in Radio – A System Study", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, No. 2, pp. 565-572, February 2010.

[3] F. Tamburini, E. Mari, A. Sponselli, F. Romanato, B. Thidé, A. Bianchini, L. Palmieri and C. Smeda, "Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test," New Journal of Physics, vol. 14, no. 033001, March 2012.

[4] A. Bennis, R. Niemiec, C. Brousseau, K. Mahdjoubi and O. Emile, "Flat plate for OAM generation in the millimeter band," in EuCAP2013 – European Conference on Antennas & Propagation, Gothenburg, Sweden, 2013.

[5] E. Yao, S. Franke-Arnold, J. Courtial, S. Barnett, and M. Padgett, "Fourier relationship between angular position and optical angular momentum," Optics Express, vol. 14, pp. 907-9076, 2006.

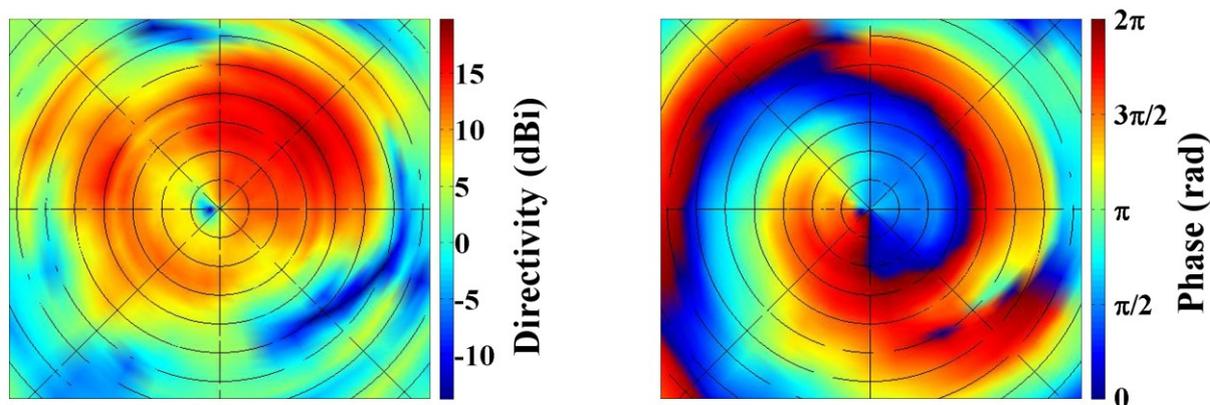


Figure 1 : Caractérisation en espace libre (chambre anéchoïque) de la lame de phase plate à la fréquence $f = 32$ GHz. Chaque cercle concentrique représente une variation de 3 degrés pour l'angle φ . (Figure de gauche) Mesure de la directivité, avec la forme en « donut » caractéristique. (Figure de droite) Mesure de la phase.

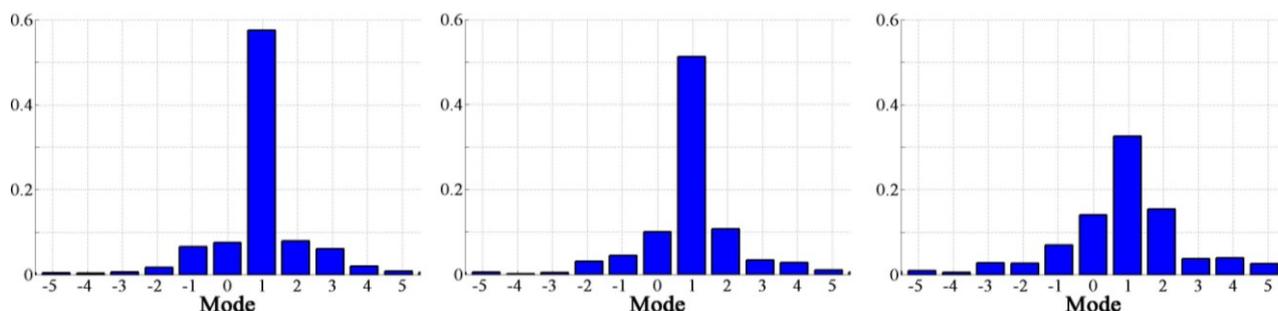


Figure 2 : Décomposition en mode propre d'OAM pour différentes ouvertures du cercle. (Gauche) Décomposition pour un cercle de 5°. (Milieu) Décomposition pour un cercle de 10° (Droite) Décomposition pour un cercle de 15°.