



Transfert de moment angulaire orbital d'une onde EM à un objet macroscopique dans la bande UHF

Transfer of orbital angular momentum on a macroscopic object in the UHF frequency band

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

^{*}IETR – Institut d'Electronique 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
 ronan.niemiec@univ-rennes1.fr

Mots clés : Moment angulaire orbital; transfert mécanique; UHF
 Keywords: Orbital angular momentum; mechanical transfer; UHF

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 distinctes [1] : le moment angulaire de spin qui correspond à la polarisation de l'onde, et le moment angulaire orbital (OAM) qui est associé à la distribution spatiale (amplitude et phase) du champ électrique. Ainsi, 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 d'azimut. De plus, la distribution de la phase induit une interférence destructrice sur l'axe du faisceau, créant un vortex.

D'un autre côté, à cause de cette distribution de phase, une telle onde transporte du moment cinétique. En interagissant elle peut transférer ce moment et induire un couple mécanique. Ce phénomène a déjà été observé, dans le cas du moment angulaire de spin, que ce soit à l'échelle macroscopique en optique [2,3] et en micro-ondes [4], ou à l'échelle microscopique, en optique uniquement [5]. Dans le cas de l'OAM, cet échange n'a été jusqu'à présent mis en évidence qu'en optique, et à l'échelle microscopique [6]. Le but de cette étude est donc de quantifier les échanges entre une onde EM portant de l'OAM et un objet macroscopique, en micro-ondes, à la fréquence $f = 870 \text{ MHz}$.

1. Considérations théoriques

La source est une antenne dite « tourniquet » constituée de deux dipôles croisés et déphasés de $+\pi/2$ ou $-\pi/2$, déphasage fonction de l'ordre d'OAM l . Le récepteur est un anneau de cuivre suspendu (voir Figure 1). Un tel montage a déjà été proposé par Vul'fson [7]. Une des principales caractéristiques d'une antenne tourniquet est son rayonnement isotrope, ce qui implique un champ électrique quasiment constant sur toute la circonférence de l'anneau et assure donc la symétrie du système [8]. Même si cette antenne est parfois utilisée pour générer une polarisation circulaire dans le plan perpendiculaire à l'antenne, suivant la direction de propagation, nous nous intéressons uniquement au champ EM rayonné dans le plan de l'antenne dans lequel est placé l'anneau récepteur. Le champ électrique s'écrit en champ lointain :

$$E_{\theta} = -\frac{\theta}{4 \cdot \epsilon_0 \cdot c \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{r} \cdot I_0 \cdot e^{j(\omega t - r/c)}, \quad (1)$$

avec L , la longueur du dipôle, ϵ_0 , la constante diélectrique, c , la vitesse de la lumière, ω , la pulsation de l'onde, λ , la longueur d'onde, I_0 , l'amplitude, $(r; \theta)$, les coordonnées polaires, et k , le nombre d'onde.

Par analogie avec l'optique, le moment angulaire orbital transporté par le champ électrique dans le plan de l'antenne est alors de \hbar par photon. Il a été vérifié numériquement que cela reste vrai dans les conditions de l'expérience, au niveau de l'anneau de cuivre, à la fois par le calcul et grâce au logiciel de simulation numérique CST. Des mesures ont aussi déjà été réalisées dans des conditions équivalentes [9], pour un résultat similaire.

L'équation (1), et plus particulièrement l'exponentielle $e^{-jl\theta}$, indique une dépendance linéaire de la phase en fonction de l'angle θ , et donc la présence d'OAM avec un ordre $|l| = 1$. Le signe de l , et donc le sens de rotation de la phase, est directement lié au signe du déphasage entre les deux composantes de l'antenne.

2. Résultats expérimentaux

L'antenne est alimentée avec un signal de puissance variable. Chaque mesure est faite à partir d'un anneau. Comme le montrent les Figures 2a et 2b, le mouvement observé est une accélération quasi-uniforme de la rotation. Lorsque la puissance alimentant l'antenne augmente, l'accélération angulaire augmente également.

Dans un second temps, le signe du déphasage entre les deux composantes de l'antenne a été inversé, changeant le signe moins devant θ dans l'équation (1) et faisant passer l'OAM porté par un photon de \hbar à $-\hbar$. Comme attendu, le sens de rotation est lui aussi inversé. De plus, pour une puissance donnée, la symétrie entre les deux sens de rotation est quasi-parfaite. Finalement, lorsque les deux composantes sont en phase, aucune rotation n'est observée, ce qui confirme que les effets parasites sont négligeables dans les conditions de l'expérimentation.

L'accélération angulaire induite par le champ électrique en fonction de la puissance est représentée à la Figure 2b. Une dépendance quasi-linéaire avec la puissance d'excitation est visible. Cette dépendance linéaire est aussi en accord avec la valeur théorique du couple calculée à partir des paramètres expérimentaux. De plus, elle reste valide pour plus d'un ordre de magnitude, de 1,5 W à 25 W. La symétrie entre les deux sens de rotation est elle aussi retrouvée. Ces résultats montrent clairement et pour la première fois un transfert direct d'OAM à un objet macroscopique en radiofréquence.

Conclusion

Le transfert de moment angulaire orbital d'une onde électromagnétique à un objet macroscopique a pu être observé dans les bandes radiofréquences. L'accélération de l'anneau et la direction de la rotation ont pu être contrôlées, respectivement par la puissance du signal transmis aux antennes et le signe du déphasage entre les deux composantes de l'antenne.

Ce travail a pu être réalisé grâce au soutien financier de l'Université de Rennes 1, de la Direction Générale de l'Armement (DGA) et de la Région Bretagne.

Références bibliographiques

- [1] J.D. Jackson, Classical Electrodynamics, New York: Wiley, 1998.
- [2] R.A. Beth, « Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light, » Phys. Rev., Vol. 50, 115–125, 1936.
- [3] G. Delannoy, O. Emile et A. Le Floch, « Direct observation of a photon spin-induced constant acceleration in macroscopic systems, » Appl. Phys. Lett., Vol. 86, 1064-1076, 2005.
- [4] N. Carrara, « Torque and angular momentum of centimeter electromagnetic waves, » Nature, Vol. 164, 882-884, 1949.
- [5] M.E.J. Friese, T.A. Nieminen, N.R. Heckenberg et H. Rubinsztein-Dunlop, « Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles, » Nature, Vol. 394, 348-350, 1998.
- [6] H. He, M.E.J. Friese, N.R. Heckenberg et H. Rubinsztein-Dunlop, « Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity, » Phys. Rev. Lett., Vol 75, 826-829, 1995.
- [7] K.S. Vul'fson, « Angular momentum of electromagnetic waves, » Sov. Phys. Usp., Vol. 30, 8, 724-728, 1987.
- [8] S.G.M. Darwish, K.F.A. Hussein, H.A. Mansour, « Circularly polarized crossed-dipole turnstile antenna for satellites, » Proc. 21th NRSC2004 - National Radio Science Conference, Monterey, California, USA, 2004.
- [9] K. Sudo, J. Hirokawa, and M. Ando, « Two types of exciting modes in a rectangular-to-radial waveguide transformer as a feeder of radial line slot antennas, » Proc. 33rd Eur. Microwave Conf. 3, 935, 2003.

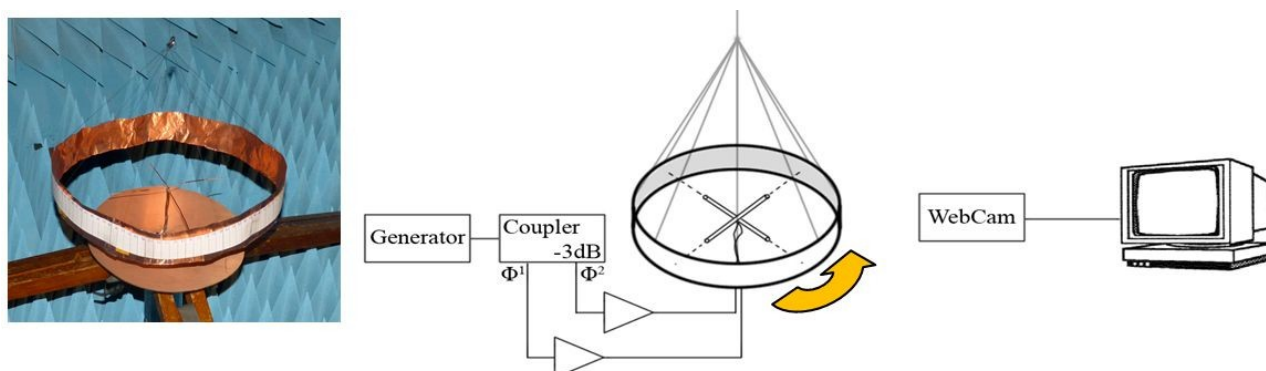
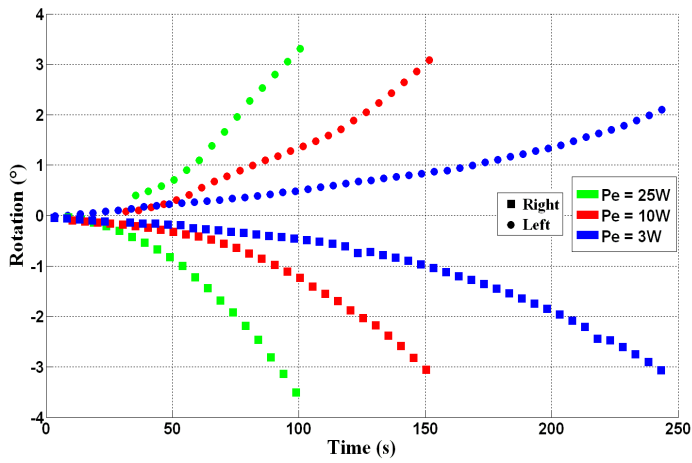
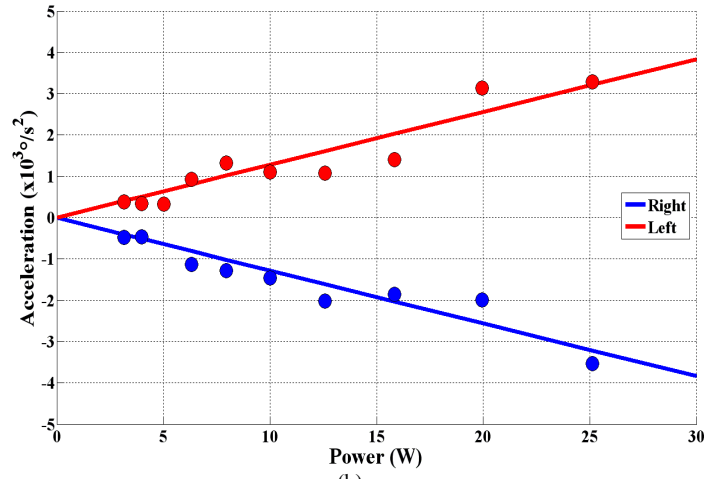


Figure 1 : Montage expérimental. L'anneau de cuivre récepteur est placé dans le plan des antennes et est suspendu par huit fils de coton.



(a)



(b)

Figure 2 : Mesures de la mise en rotation de l'anneau.

- (a) : Rotation angulaire en fonction du temps. Pour un souci de clarté, seulement trois puissances (3 W, 10 W et 25 W) sont représentées.
- (b) : Accélération en fonction de la puissance d'alimentation des antennes.