

Effet Doppler rotationnel, en configuration bistatique, sur un objet en forme d'hélice

Emile Olivier, Christian Brousseau, Janine Emile

▶ **To cite this version:**

Emile Olivier, Christian Brousseau, Janine Emile. Effet Doppler rotationnel, en configuration bistatique, sur un objet en forme d'hélice. Propagation Radioélectrique, Caractérisation de l'environnement, Nov 2021, Cesson Sévigné, France. hal-03481649

HAL Id: hal-03481649

https://univ-rennes.hal.science/hal-03481649

Submitted on 15 Dec 2021

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.

Effet Doppler rotationnel, en configuration bistatique, sur un objet en forme d'hélice

EMILE Olivier
Université de Rennes 1
F-35000 Rennes
olivier.emile@univ-rennes1.fr

BROUSSEAU Christian
Université de Rennes 1
CNRS IETR UMR 6164
F-35000 Rennes
christian.brousseau@univ-rennes1.fr

EMILE Janine
Université de Rennes 1
CNRS IPR UMR 6251
F-35000 Rennes
janine.emile@univ-rennes1.fr

***Abstract*—La lumière issue du mode Gaussien fondamental d'un laser est collectée derrière un objet simulant une hélice. La décomposition est faite dans une base de mode de Laguerre Gauss. Ces modes transportent du moment angulaire orbital. Cette décompostion permet d'identifier les symétries de l'objet étudié et, lorsque l'objet est en rotation, de mesurer la vitesse de rotation grâce à l'observation d'un décalage en fréquence dû à l'effet Doppler rotationnel.**

***Index Terms*—effet Doppler rotationnel, moment angulaire orbital**

I. Introduction

L'effet Doppler rotationnel est l'analogue de l'effet Doppler linéaire usuel, mais pour des objets en rotation sur eux-mêmes. Il est lié à l'échange de Moment Angulaire Orbital (OAM en anglais), ou de spin (polarisation) entre l'onde électromagnétique et l'objet en rotation [1]. Dans la majorité des cas, les auteurs étudient le décalage en fréquence de la lumière transportant de l'OAM, diffusée par un objet en rotation [2]. D'autres expériences, plus rares, étudient la variation de fréquence de la lumière OAM transmise ou réfléchie par un objet spécifique qui modifie l'OAM [3], [4]. De façon beaucoup plus simple et générale, on peut se demander si il est possible d'observer un décalage Doppler sur la lumière transmise derrière un objet en rotation. L'objet de la présentation est précisemment d'étudier la décomposition de la lumière transmise après un tel objet sur des modes d'onde lumineuse transportant de l'OAM.

II. Dispositif expérimental

La figure 1 présente le dispositif expérimental utilisé. Un laser infra-rouge à la longueur d'onde $\lambda = 1.55$ μm (sécurité oculaire) éclaire un objet en rotation ayant la forme d'une hélice. La lumière transmise est démultiplexée à l'aide d'un système commercial (système PROTEUS de chez CAILabs) [5] sur les modes OAM, couplés à des fibres optiques. Ces modes ont une phase qui varie de 2π multiplié par un nombre entier (appelé charge topologique ℓ), dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation, sur un tour. Plus précisemment, elle s'écrit $\ell\theta$, θ étant l'angle azimutal. La source et la détection sont donc en vis-à-vis l'une de l'autre dans une configuration bistatique. Il est possible de détecter directement les intensités des modes grâce à une photodiode fibrée, ou les battements en fréquence entre les modes. Alternativement, il est possible de mesurer le décalage en fréquence en effectuant une détection hétérodyne à partir du faisceau de référence décalé en fréquence grâce à des modulateurs acousto-optiques.

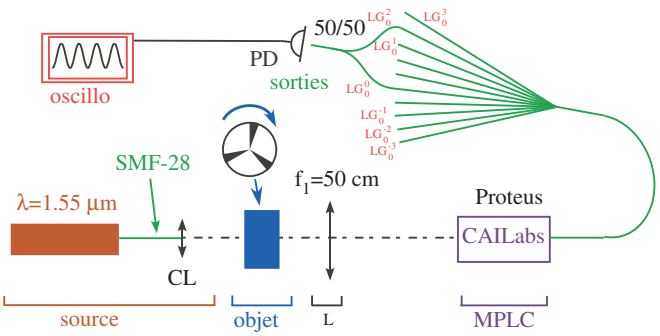


Fig. 1. Dispositif expérimental : SMF 28 : fibre laser monomode ; CL : lentille de collimation ; MPLC : démultiplexeur en modes OAM ; PD : Photodiode ; Oscillo : Oscilloscope. Les indications à la sortie des fibres correspondent au mode de Laguerre-Gauss.

III. Résultats expérimentaux

A. Objet statique

Considérons tout d'abord le dispositif expérimental en l'absence d'objet. Dans ce cas, il est noter que le faisceau lumineux est parfaitement adapté au démultiplexeur. Le signal détecté correspond au mode fondamental du détecteur (voir Fig 2a). Lorsque l'on insère un objet, le signal sur les modes transportant de l'OAM augmente. Celui sur le mode fondamental diminue. Pour un objet ayant une symétrie de $2\pi/n$ seuls les modes ayant la même symétrie que l'objet (i. e. une charge topologique multiple de n) ont une contribution significative.

Pour $n = 1$ (Fig 2b), les modes correspondant à $\ell = 1, 2, 3$ jouent un rôle. Pour $n = 2$ (Fig 2c), seul le mode correspondant à $\ell = 2$ a de l'importance. Pour $n = 3$ (Fig 2c), seul le mode correspondant à $\ell = 3$ contribue au signal. Ainsi, il est donc possible d'identifier précisément la symétrie de l'objet en étudiant la décomposition de la lumière transmise sur la base des faisceaux de Laguerre Gauss.

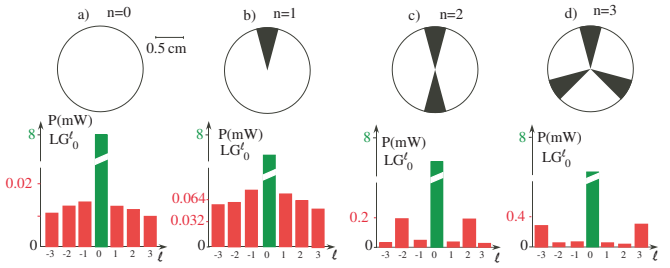


Fig. 2. Intensité de la lumière transmise démultiplexée a) en l'absence d'objet, avec 1, 2 ou 3 pales b), c), d) respectivement. Attention, les échelles du bas ne sont pas les mêmes pour chaque figure.

B. Objet en rotation

Lorsque l'on effectue une rotation d'un angle θ_0, l'ombre portée sur la lumière transmise va elle aussi subir une même rotation. Elle correspond à en fait un décalage de l'origine des angles. Cette rotation va donc se traduire par une variation de phase qui dépend de la charge topologique et qui vaut $\ell\theta_0$.

Si à présent l'objet tourne à une fréquence ν_{rot}, la variation de phase va s'écrire $2\pi\ell\nu_{rot}t$. Elle correspond à un décalage Doppler en fréquence qui vaut

$$\triangle\nu_{Doppler} = \ell\nu_{rot} \tag{1}$$

Lorsque l'objet tourne dans le même sens que la variation de phase liée au moment angulaire orbital (par exemple, rotation de l'objet dans le sens trigonométrique direct et $\ell > 0$), la fréquence lumineuse diminue (on parle aussi de décalage vers le rouge). A l'inverse, lorsque les signes sont opposés, la fréquence augmente (on parle aussi de décalage vers le bleu).

Expérimentalement, il est possible de détecter le signe du décalage Doppler à l'aide de la détection hétérodyne. Nous avons également fait varier la fréquence de rotation de l'objet, ainsi que son signe (voir Fig. 3). Nous avons effectué ces mêmes mesures pour des symétries différentes de l'objet, avec des hélices comportant 1, 2, ou 3 pales.

On observe bien une variation linéaire du décalage Doppler en fonction de la fréquence de rotation, en accord avec l'équation Eq. 1. Le décalage est également proportionnel à la charge topologique. Il est à noter que ce décalage Doppler est indépendant de la symétrie de l'objet. Par contre lorsque l'objet et le mode de Laguerre Gauss n'ont pas la même symétrie, le signal en sortie du démultiplexeur est pratiquement nul et ne permet pas une détection du décalage Doppler rotationnel. Il est donc possible, en même temps, d'étudier les symétries de l'objet et la vitesse de rotation de ce même objet.

Les expériences ont été effectuées ici sur la lumière en transmission dans une configuration bistatique. La technique utilisée peut être directement adaptée dans une configuration monostatique avec de la lumière réfléchie par l'objet, où l'émetteur et le récepteur sont situés au même endroit [6].

La longueur d'onde que nous avons utilisée est dans l'infrarouge ($\lambda = 1,55\ \mu$m). Elle correspond aux longueurs d'ondes télécoms et est dans la fenêtre de la sécurité oculaire.

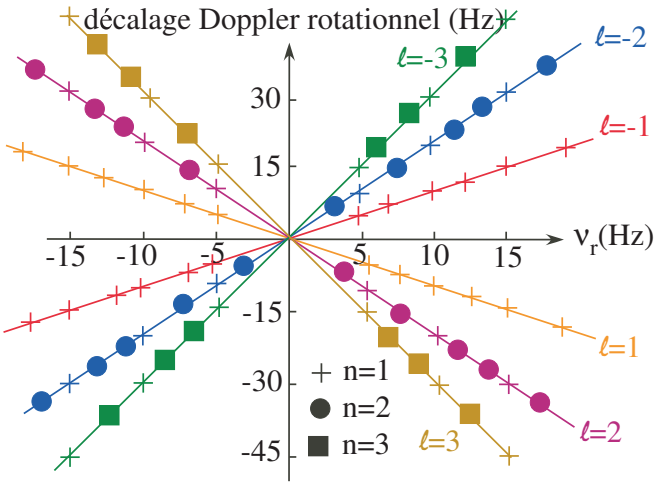


Fig. 3. Variation du décalage Doppler en fonction de la fréquence de rotation. Les droites correspondent aux attentes théoriques. Une fréquence de rotation négative correspond à une rotation dans le sens trigonométrique inverse.

Cette longueur d'onde peut être adaptée suivant les applications visées, les lois de l'électomagnétisme étant invariantes en fonction de la longueur d'onde. Par exemple, dans le cas de détection d'hélices de bateaux ou de sous-marins, il suffit de changer la source pour une lumière dans le vert qui se propage plus facilement en milieu marin, et d'adapter le démultiplexage. Ceci est également vrai pour les ondes dans le domaine radar, où des sources émettant une radiation transportant du moment angulaire orbital sont disponibles depuis une quinzaine d'années [7]. C'est probablement dans cette gamme de longueur d'ondes que les applications de l'effet Doppler rotationnel semblent les plus prometteuses.

REFERENCES

[1] L. Fang, M. J. Padgett, and J. Wang, "Sharing a common origin between the rotational and linear Doppler effects," Laser Photon. Rev. vol. 11, 1700183 (2017).

[2] M. P. Lavery, F. C. Speirits, S. M. Barnett, and M. J. Padgett, "Detection of a spinning object using lights orbital angular momentum," Science vol. 341, 537 (2013).

[3] J. Courtial, D. Robertson, K. Dholakia, L. Allen, and M. Padgett, "Rotational frequency shift of a light beam," Phys. Rev. Lett. vol. 81, 4828 (1998).

[4] O. Emile, J. Emile, and C. Brousseau, "Rotational Doppler shift upon reflection from a right angle prism," Appl. Phys. Lett. vol. 116, 221102 (2020).

[5] G. Labroille, B. Denolle, P. Jian, P. Genevaux, N. Treps, and J.-F. Morizur, "Efficient and mode selective spatial mode multiplexer based on multi-plane light conversion," Opt. Express Vol. 22, 15599 (2014).

[6] O. Emile, J. Emile, and C. Brousseau, "Rotational Doppler effect on reflexion upon an ideal rotating propeller," unpublished.

[7] B. Thidé, H. Then, J. Sjöholm, K. Palmer, J. Bergman, T. Carozzi, Y. N. Istomin, N. Ibragimov, and R. Khamitova, "Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain," Phys. Rev. Lett. vol. 99, 087701 (2007).