

Synchronisation de molécules de solitons à respiration dans une cavité laser fibrée

Xiuqi WU¹, Junsong PENG^{1*}, Sonia BOSCOLO², Christophe FINOT³, and Heping ZENG

¹ State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai, China

² Aston Institute of Photonic Technologies, Aston University, Birmingham, United Kingdom

³ LICB, UMR 6303 CNRS – Université de Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France

*jspeng@lps.ecnu.edu.cn;

RÉSUMÉ

Nous présentons les observations expérimentales et numériques de la synchronisation et de la désynchronisation subharmoniques de molécules de solitons dissipatifs à respirations dans un laser à fibre ultrarapide. Un régime intermédiaire est également dévoilé, présentant une auto-modulation de l'état synchronisé.

MOTS-CLEFS : *laser à fibre ; solitons à respiration ; dynamique non-linéaire*

1. INTRODUCTION

La synchronisation, phénomène omniprésent de verrouillage de fréquence entre oscillateurs non linéaires couplés, a été étudiée dans de nombreuses disciplines [1]. Les solitons à respiration, qui se manifestent sous la forme de structures temporelles/spatiales localisées présentant un comportement oscillatoire périodique, sont des modes fondamentaux de nombreux systèmes physiques non linéaires et sont liés à un large éventail de dynamiques non linéaires essentielles. En optique, initialement étudié dans les systèmes de fibre à simple [2], le concept de soliton à respiration a été étendu aux cavités de Kerr passives [3, 4], aux micro-résonateurs [5] ainsi qu'aux lasers à fibre ultra-rapides [6-8]. Les études de [4, 7] ont montré que les cavités optiques peuvent supporter des respirations qui sont entraînées de manière subharmonique au temps de parcours de la cavité. Cet entraînement subharmonique de la respiration est une forme généralisée de synchronisation dans laquelle une harmonique de la fréquence de respiration f_b se synchronise avec la fréquence de la cavité f_r . Dans [9], nous avons montré que le rapport f_b/f_r d'un laser à fibre à respiration présente la hiérarchie d'un arbre de Farey et la structure d'un escalier du diable.

Cette nouvelle étude étend nos précédentes recherches [4, 7, 9] en démontrant pour la première fois la synchronisation subharmonique d'états liés stables de molécules de solitons à respiration. Trois régimes différents de synchronisation sont mis en évidence et discutés.

2. MONTAGE EXPÉRIMENTAL, RÉSULTATS, ET DISCUSSION

Le laser mis en œuvre repose sur une cavité annulaire standard à fibre dopée à l'erbium avec une dispersion légèrement anormale, dans laquelle le verrouillage des modes est assuré par la rotation non-linéaire de polarisation. La fréquence de répétition du laser est $f_r = 33,39$ MHz. La puissance de la pompe est le paramètre clé de ce système et permet de passer d'un soliton stationnaire à un soliton respirant, ou bien de molécules de solitons stationnaires à des états liés de soliton respirants [6][10].

La figure 1(a) montre l'évolution du spectre radiofréquence (RF) en fonction du courant de pompe. À des courants faibles (jusqu'à 102mA), notre laser émet une seule impulsion solitonique par tour de cavité, comme le souligne la composante à fréquence RF à f_r .

L'augmentation du courant de pompe conduit à la génération d'un soliton à respiration avec une période de pulsation de 4 tours de cavité, comme le révèle l'apparition de pics sous-harmoniques étroits situés à des multiples de $f_b = f_r / 4$: la fréquence de respiration f_b est verrouillée sur la fréquence de répétition de la cavité [9].

La transition du soliton stationnaire au soliton respirant est corrélée à la dynamique connue sous le nom de "bifurcation de Hopf". Une augmentation supplémentaire du courant de pompe provoque l'apparition de nouvelles lignes spectrales également espacées de manière symétrique des deux côtés des pics sous-harmoniques. La séparation entre ces nouvelles lignes, formant une structure "sous-harmonique modulée", est associée à une longue période de pulsation dans le domaine temporel.

Les courants de pompe supérieurs à 106mA rompent le verrouillage de fréquence (les bandes latérales modulées disparaissent également), et la fréquence de respiration dérive continuellement à mesure que la force de pompage varie, de sorte que f_b n'est plus commensurable avec f_r . Nous appelons ce régime "respiration non sous-harmonique". Pour des courants supérieurs à 111mA, le régime de pulsation disparaît, remplacé par une courte phase de comportement de type chaotique puis l'émission de molécules solitoniques diatomiques stationnaires jusqu'à 117mA, lorsque des impulsions à respiration sont à nouveau générées. Entre 120 et 123mA, les comportements sous-harmoniques et sous-harmoniques modulés réapparaissent tandis que des caractéristiques non harmoniques sont apparentes entre 117 et 120mA puis entre 123 et 133mA. Au-dessus de 133mA, la molécule de soliton à respiration diatomique passe à une molécule triatomique, et un schéma d'évolution similaire du spectre RF de sous-harmonique à sous-harmonique modulé et à respiration non sous-harmonique est à nouveau enregistré.

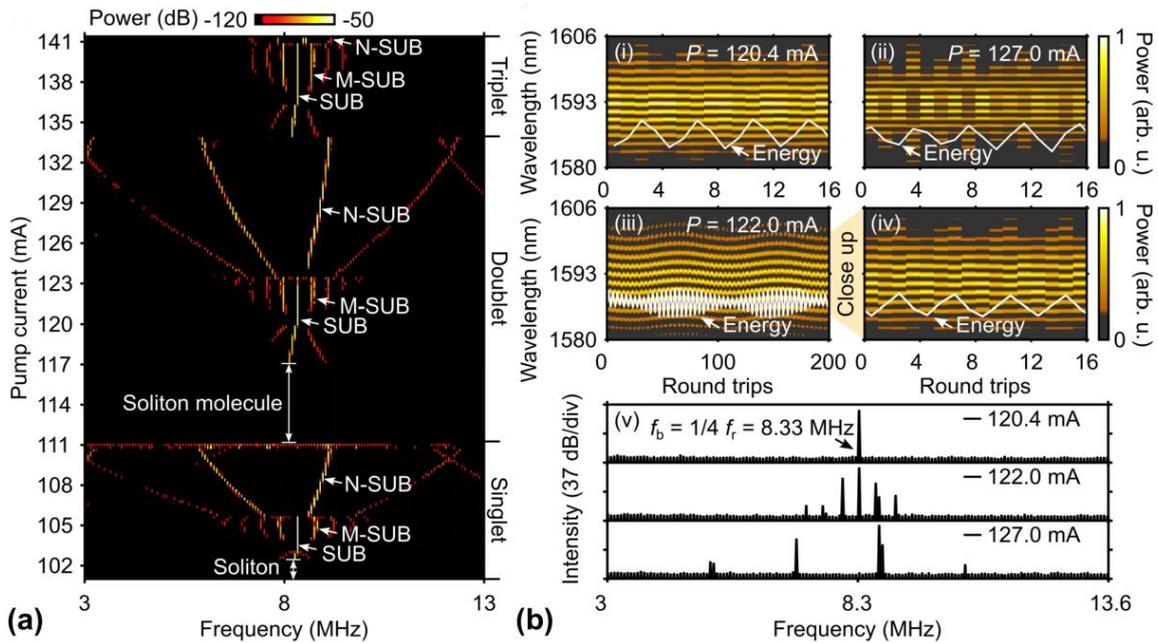


Figure 1. (a) Carte de l'intensité spectrale radio-fréquence du laser en fonction du courant de pompe, montrant les transitions de phase pour les solitons à respiration simples, et les molécules di- et tri-atomiques. (b) Spectres optiques monocoups obtenus par la transformée de Fourier dispersives de molécules diatomiques solitoniques à respiration : régimes sous-harmoniques, sous-harmoniques modulés et non sous-harmoniques. (i-iii). Les courbes blanches dénotent les évolutions d'énergie. (iv) Une version agrandie de (iii) montrant la respiration de courte période. (v) Détails du spectre RF pour les trois régimes de respiration.

Des mesures spatio-spectrales complémentaires de la dynamique du laser dans les trois phases sont résumées dans la Fig. 1(b) pour l'exemple de la molécule de solitons à respiration diatomique. Les panneaux (i-iii) montrent les spectres optiques résolus à chaque tour de cavité grâce à la technique de la transformée de Fourier dispersive [11]. Des variations périodiques de l'intensité spectrale sur une période bien définie de 4 tours de cavité peuvent être observées pour le régime sous-harmonique, accompagnées de changements périodiques synchrones correspondants de l'énergie de l'impulsion. En revanche, le régime non sous-harmonique montre des périodicités dégradées à la fois dans le spectre optique et l'énergie. Dans les deux régimes, la période des franges spectrales reste presque inchangée, indiquant une séparation d'impulsion intra-moléculaire presque constante. Le régime sous-harmonique modulé présente deux ensembles de périodicités avec une longue période d'environ 88 tours de cavités et une courte période de 4 tours de cavité. Les détails des spectres RF correspondants au voisinage de $f_r/4$ (panneau (v)) mettent également en lumière les différences entre les trois régimes : l'état sous-harmonique présente une seule composante de fréquence très étroite située exactement à $f_b = f_r/4$, tandis qu'un ensemble de bandes latérales étroites également espacées de chaque côté de $f_b = f_r/4$ est observé pour le cas sous-harmonique modulé. En contraste net avec cela, le régime non sous-harmonique présente des lignes spectrales beaucoup plus larges, confirmant le fonctionnement déverrouillé en fréquence du laser.

La dynamique du laser pour le régime de génération de molécules triatomiques de soliton à respiration a montré des caractéristiques qualitativement similaires. Nos résultats expérimentaux ont été confirmés par des simulations numériques du laser basées sur un modèle global où chaque partie de la cavité a été modélisée séparément. En changeant l'état de polarisation du laser dans les expériences ou, de manière équivalente, en augmentant la perte linéaire intra-cavité dans le modèle, des transitions directes de synchronisation-désynchronisation (sans l'état sous-harmonique modulé intermédiaire) ont également pu être observées dans notre laser. Ces transitions directes sont des bifurcations de nœud-col [1]. L'accès complet à la dynamique temporelle du laser fourni par les simulations a révélé que dans le régime de désynchronisation, bien que les molécules de respiration dans leur ensemble ne soient pas synchronisées avec la cavité, les respirations constitutives sont synchronisées les unes aux autres avec un retard [1].

RÉFÉRENCES

1. A. Pikovsky, M. Rosenblum, J. Kurths, Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Science (Cambridge Univ. Press, 2001).
2. J.M. Dudley et al., Nat. Photon. 8, 755–764 (2014).
3. F. Leo et al., Opt. Express 21, 9180–9191 (2013).
4. D.C. Cole, S.B. Papp, Phys. Rev. Lett. 123, 173904 (2019).
5. E. Lucas et al., Nat. Commun. 8, 736 (2017).
6. J. Peng et al., Sci. Adv. 5, eaax1110 (2019).
7. T. Xian et al., Phys. Rev. Lett. 125, 163901 (2020).
8. X. Wu et al., Laser Photon. Rev. 16, 2100191 (2022).
9. X. Wu et al., Nat. Commun. 13, 5784 (2022).
10. K. Krupa et al., Phys. Rev. Lett. 118, 243901 (2017).
11. K. Goda, B. Jalali, Nat. Photon. 7, 102–112 (2013).