

CFA/VISHNO 2016

Vibromètre laser Doppler par réinjection optique

V. Girardeau, O. Jacquin, E. Lacot, O. Hugon et H. Guillet De Chatellus
LIPhy, 140 Rue de la Physique, 38400 St Martin D Heres, France
vadim.girardeau@ujf-grenoble.fr



LE MANS

By using laser optical feedback imaging (LOFI), thanks to the interference inside the laser cavity, we can extract the amplitude and the phase of the electromagnetic wave retrodiffused by a target. By comparison with a conventional interferometer, the LOFI setup can be several orders of magnitude more sensitive. In this paper, we use a LOFI setup as a vibrometer sensor. We are able to detect vibration of a few hundred Hz up to a few hundred kHz. We explain how we can detect low frequency vibration and how we can detect higher frequency vibration. By sending a few milliwatts output power microchip laser beam on a diffusive target, a vibration of 200 kHz with amplitude of a few Angstrom has been experimentally determined.

1. Introduction

L'imagerie photo-acoustique (PA) est une technique qui connaît un grand engouement en imagerie de milieux biologiques (diffusants) depuis quelques années [1,2]. Elle permet de coupler les propriétés de contraste des techniques d'imageries optiques et les propriétés de pénétration/profondeur des techniques d'imageries ultrasonores. Une onde acoustique est générée par absorption optique (contraste optique) de l'objet à imager en profondeur, puis est détectée en surface.

La motivation principale de ce travail est de proposer une alternative optique à la détection piézoélectrique des signaux acoustiques en imagerie PA. L'avantage majeur de la détection piézoélectrique est sa très grande sensibilité ($\mu\text{V}/\text{kPa}$) permettant de détecter des ondes acoustiques de très faible pression (100 Pa), mais au prix mais d'une bande passante limitée (liée à la résonance de la sonde piézoélectrique) et de la nécessité de mettre la sonde en contact avec l'objet à imager. De son côté une détection optique interférométrique présente l'avantage d'être sans contact et large bande, mais au prix d'une sensibilité moindre (kPa).

Plus précisément, l'objectif final de ce travail est d'utiliser les performances des détecteurs laser à réinjection optique [3] et plus particulièrement de la technique LOFI (Laser Optical Feedback Imaging [4]) pour détecter des ondes de pression de faible amplitude (quelques kPa) dans une gamme de fréquences allant typiquement de 100 kHz à plusieurs dizaines de MHz. Notre objectif est donc de réaliser un vibromètre laser à réinjection optique [5,6], permettant de mesurer des déformations sub-nanométriques induites par des ondes acoustiques.

2. Technique LOFI

2.1 Principe

La méthode LOFI est une technique d'imagerie interférométrique hétérodyne extrêmement sensible qui met en jeu la dynamique des lasers [7,8]. Elle permet de mesurer avec une grande précision le signal rétrodiffusé par une cible et d'en déduire sa carte de réflectivité et de phase (distance laser/cible) avec une précision spatiale de l'ordre du micromètre. Dans cette méthode, l'interférence a lieu dans le laser, entre la lumière intra-cavité et la lumière rétrodiffusée par la cible à imager. La lumière rétrodiffusée est décalée en fréquence afin de créer un battement optique intra-cavité. La mesure de l'amplitude et de la phase de cette modulation permet de

réaliser des images d'amplitude (c-à-d de rétrodiffusion) et des images de phase (c-à-d de profilométrie par exemple) d'objets non coopératifs dans des milieux diffusants. En effet, si la fréquence de décalage F_0 (la fréquence du battement) est proche ou égale à la fréquence de relaxation du laser $F_{relaxation}$, on a alors une amplification de ce battement optique de l'ordre de $G_{LOFI} = 10^6$ avec un micro-laser Nd-YAG. On peut ainsi mesurer des réflectivités de l'ordre de 10^{-13} (soit un photon rétrodiffusé sur 10^{13}) avec un laser de quelques milliwatts, dans une bande passante du kHz. Dans cette technique d'imagerie, le laser joue donc à la fois le rôle de source et de détecteur. Le système optique est donc auto-aligné (cf. figure 1) puisque le laser et la cible à imager sont optiquement conjugués par le système optique. Les images sont réalisées point par point, en déplaçant le faisceau laser focalisé sur la cible à imager.

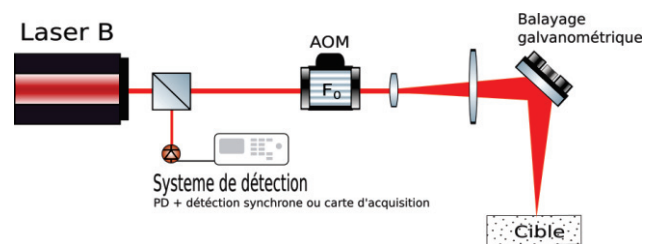


Figure 1 : Montage optique d'un dispositif LOFI, PD : photodiode, AOM : modulateur acousto-optique permettant le décalage en fréquence F_0

La technique LOFI présente alors l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et d'être limitée au bruit de photon puisque le laser est aussi le détecteur. Une mesure dynamique de la phase par la technique LOFI permet donc de faire de la vibrométrie dans des conditions peu coopératives : cible peu réfléchissante, cible distante, milieu diffusant...

2.2 Rapport signal sur bruit

La technique LOFI est limitée au bruit de photon uniquement lorsque le bruit quantique du laser est supérieur au bruit de détection, ce qui correspond à une plage bien spécifique de décalage en fréquence F_0 . Ailleurs, la technique LOFI sera limitée par le bruit de la chaîne de détection : photodiode, carte d'acquisition [7,8]... Effectivement, comme nous pouvons le voir sur la figure 2, le spectre théorique de bruit du laser (ronds vert) présente une résonance qui dépasse le bruit de la chaîne de détection (seuil rouge) aux alentours de la fréquence de relaxation du laser $F_{relaxation}$; c'est la zone de décalage en fréquence où le capteur LOFI est limité

par le bruit de photon. Dans cette zone, le rapport signal sur bruit (SNR) est indépendant de la fréquence de décalage F_0 et est limité uniquement par le nombre de photons réinjectés dans le laser ; le SNR étant défini par la hauteur du pic correspondant au battement optique à la fréquence F_0 (figure 2). Dans une zone de fréquence limitée par le bruit de la chaîne de détection, le SNR est limité par la puissance de réinjection et devient dépendant de la fréquence de réinjection F_0 . Effectivement, la base de la porteuse descend sous le niveau de bruit et il faut donc retrancher cette valeur de bruit au signal pour obtenir le SNR. Le signal, pour être détecté, devra dépasser le niveau de bruit, ce qui limite l'amplitude du signal à détecter autour de la porteuse [7,8].

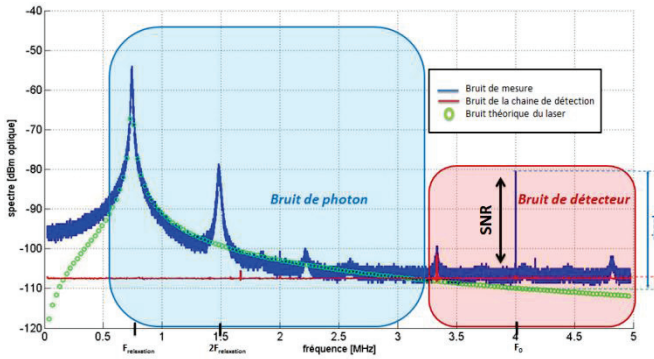


Figure 2 : Spectre du bruit de mesure du système LOFI et ses fit

Le LOFI est donc en résumé une technique d'imagerie extrêmement sensible analogue à un interféromètre hétérodyne, le tout étant auto-aligné et limité par le bruit de photon [7,8]. Cette technique donne accès à l'amplitude et à la phase de l'onde rétrodiffusée par la cible, au niveau du point de focalisation.

3. Vibromètre basse fréquence

Dans le cas d'une cible animée d'un mouvement sinusoïdal à la fréquence f_v et d'amplitude $a_v(x, y, t)$, les expressions du signal LOFI et de la phase induite sont respectivement données par les équations 1a et 1b :

$$S_{LOFI} = 2\sqrt{R_{eff}}G_{LOFI}(F_0) \cos(2\pi F_0 t + \phi(x, y, t)) \quad (1a)$$

$$\phi(x, y, t) = 2ka_v(x, y, t) \sin(2\pi f_v t) \quad (1b)$$

R_{eff} est la réflectivité effective de la cible, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ est le vecteur d'onde, λ est la longueur d'onde faisceau optique

En utilisant une détection synchrone, on peut mesurer aisément $\phi(x, y, t)$ dans le cas de vibrations compatibles avec la bande passante de la détection synchrone, typiquement de quelques kHz pour un temps d'intégration de 1 ms. Une application possible est alors la détection de défauts dans une structure, par cartographie (x, y) de vibration. La figure 3 montre le

cas d'une dalle de béton (cible peu coopérative car faiblement réfléchissante) présentant une fissure sur une seule face (cf. figures 3a, 3b). Une vibration de 150 Hz est imposée à la dalle à l'aide d'un haut-parleur. En éclairant avec le système LOFI la face de la plaque où la fissure n'apparaît pas, on détermine l'amplitude de vibration à 150 Hz en chaque point de la dalle et on obtient ainsi la figure 3c. On distingue clairement la fissure qui correspond à une discontinuité d'amplitude de vibration. La position et la forme de la fissure correspondent bien à celles de la dalle retournée de la figure 3a [6].

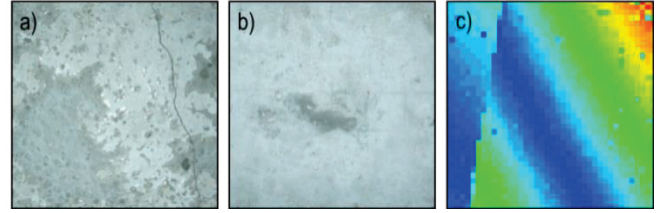


Figure 3 : Cartographie de l'amplitude de vibration à une fréquence de 150Hz d'une dalle présentant une fissure non débouchante. a) face arrière de la dalle, b) face avant de la dalle, c) amplitude de vibration à 150Hz mesuré sur la face avant de la dalle [6].

4. Vibromètre haute fréquence

Dans le cas d'une cible animée d'un mouvement sinusoïdal de fréquence f_v de plusieurs dizaine de kHz l'utilisation d'une détection synchrone n'est plus appropriée. On peut alors déterminer la phase $\Phi(x, y, t)$ en faisant l'acquisition de la trace temporelle du signal LOFI (S_{LOFI}) et en calculant sa transformé de Hilbert [5].

$$\phi(x, y, t) = \arctan\left(\frac{H(S_{LOFI})}{S_{LOFI}}\right) - 2\pi F_0 t \quad (2)$$

avec $H(S_{LOFI})$ la transformé de Hilbert du signal LOFI

Le signal est filtré avec une bande passante de largeur ΔF supérieure au spectre de la vibration. Dans le cas d'une vibration harmonique, cela revient à sélectionner les pics des fonctions de Bessels autour de la porteuse F_0 (cf. figure 4). En effet, remarquons que tous signaux à vibrations harmoniques peuvent se décomposer avec des séries de fonctions de Bessels d'ordre n . Dans ce cas, l'équation 1 devient :

$$S_{LOFI} = \quad (3)$$

$$2\sqrt{R_{eff}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} G_{LOFI}(\omega_0 + n\omega_v) J_n(2ka_v) \cos((\omega_0 + n\omega_v)t)$$

$\omega_0 = 2\pi F_0$ est la pulsation de la modulation, $\omega_v = 2\pi f_v$ est la pulsation de vibration

Sur la figure 4, nous pouvons observer ces pics de fonctions de Bessels situés autour de la porteuse F_0 aux fréquences $F_0 \pm n f_v$. Seuls certains ordres dépassent du niveau de bruit et apparaissent autour de la porteuse. Cela dépend uniquement de l'énergie de vibration

fournie (amplitude de vibration et signal continu ou tronqué). Dans le cas d'un signal hétérodyne en vibration harmonique (donc continue) dont l'amplitude de vibration $a_v < \lambda/8\pi$ c'est-à-dire $a_v < 50\text{nm}$ à 1064nm , nous pouvons approximer les fonctions de Bessels par : $J_0(2ka_v) \approx 1$ et $J_1(2ka_v) \approx 2ka_v/2$ et $J_{n>1}(2ka_v) \approx 0$. Le signal LOFI se réécrit donc sous la forme :

$$S_{LOFI} \approx 2\sqrt{R_{eff}} \left\{ \begin{array}{l} G_{LOFI}(\omega_0) \cos(\omega_0 t) \\ +ka_v G_{LOFI}(\omega_0 - \omega_v) \cos((\omega_0 - \omega_v)t) \\ +ka_v G_{LOFI}(\omega_0 + \omega_v) \cos((\omega_0 + \omega_v)t) \end{array} \right\} \quad (4)$$

Dans l'hypothèse où $G_{LOFI}(\omega_0 - \omega_v) \approx G_{LOFI}(\omega_0 + \omega_v) \approx G_{LOFI}(\omega_0)$, nous constatons que dans le cas de vibrations continues, l'amplitude de vibration peut être approximée par l'équation 5, où J_0 et J_1 sont respectivement les amplitudes des fonctions de Bessels d'ordre 0 et 1 :

$$a_v = \frac{\lambda J_1}{2\pi J_0} \Rightarrow a_{v_min} = \frac{\lambda J_{1min}}{2\pi J_0} = \frac{\lambda}{2\pi SNR} \quad (5)$$

J_{1min} est l'amplitude minimale du pic de la fonction de Bessel d'ordre 1, c'est-à-dire que c'est l'amplitude de J_1 à partir de laquelle son pic sort du bruit de mesure. Dans la zone définie par le bruit de photon, J_{1min} est fixée par le bruit du laser ; dans la zone définie par le bruit de détecteur, J_{1min} est liée à l'amplitude de bruit du détecteur.

Cette approximation permet de déterminer l'amplitude minimale de vibration que l'on peut détecter en fonction du SNR et donc en fonction de la fréquence de réinjection F_0 . Sur la figure 4, le rapport $J_0/J_1 \approx 12\text{dB}$ correspond à une amplitude de vibration de $a_v = 42\text{nm}$. L'amplitude minimale que l'on peut détecter à cette fréquence de réinjection $F_0 = 1,14\text{MHz}$ est donnée par le SNR de la porteuse J_0 . Avec un $SNR \approx 23\text{dB}$, on détermine $a_{v_min} = 12\text{nm}$. Pour détecter des amplitudes de vibrations bien plus basses, il faut augmenter le nombre de photons réinjectés dans le laser, ce qui aura pour conséquence d'augmenter dans les mêmes proportions les amplitudes des pics de fonctions de Bessel J_0 et J_1 , avec le risque de saturer la dynamique du laser si le nombre de photons réinjectés devient trop important.

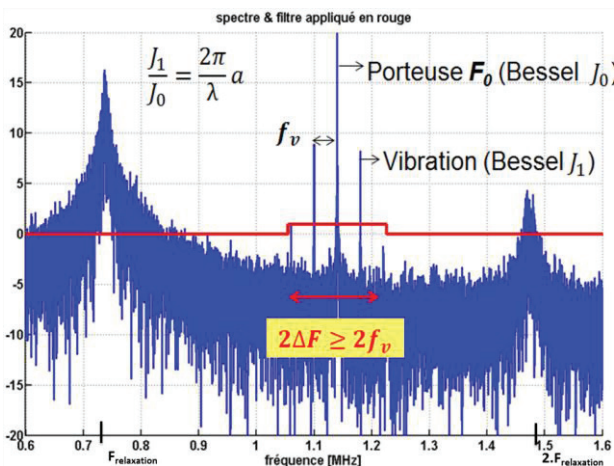


Figure 4 : Spectre du LOFI en capteur de vibration harmonique à $f_v=40\text{kHz}$ ($F_0=1,14\text{MHz}$)

5. Résultats

5.1 Détection de vibrations sur cible peu coopérante et à haute fréquence

Une pastille piézoélectrique est noyée dans un gel de PDMS (polymère siliconé) à une profondeur d'environ 1 cm. Cette dernière vibre pendant un certain laps de temps (appelé burst) à la fréquence de 200 kHz, générant une onde acoustique transitoire se propageant dans le PDMS. La figure 5 montre le résultat obtenu, mesuré à la surface du gel de PDMS transparent. On retrouve bien, sur la figure 5, la forme et la durée du burst qui est un échelon de 10 milliseconde. On peut également constater sur la figure que l'écart type de la ligne de bruit est de l'ordre de 2 nm. Si on effectue la mesure directement sur la pastille piézoélectrique, on a un bruit inférieur au nanomètre.

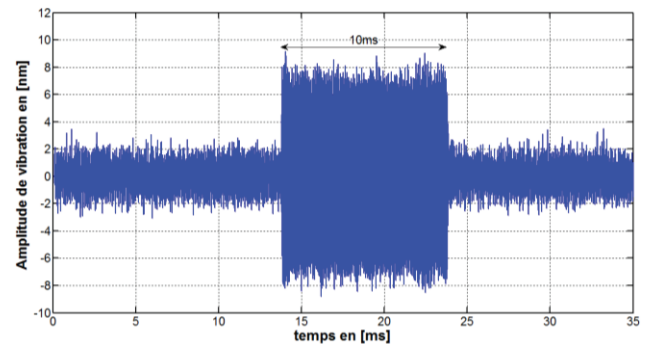


Figure 5 : Burst mesuré avec la technique LOFI, $f_v=200\text{kHz}$ et d'amplitude $a_v(t)=8\text{nm}$, 2000 cycles, période 50 ms, Puissance laser sur la cible 3 mW, distance laser/cible 1 m.

5.2 Analyse 2D

Pour faire du contrôle non destructif ou de l'imagerie médicale, une mesure spatiale est indispensable. Avec un balayage galvanométrique et un trigger adapté (en déplaçant le faisceau laser focalisé sur la surface à imager), nous obtenons une cartographie dynamique de vibration de la surface. A partir de cette vidéo, nous pourrions utiliser des algorithmes d'inversions habituels utilisés en imagerie PA [1,2] pour retrouver la position (et la géométrie) de la source acoustique, à l'origine de la vibration de la surface.

Pour étudier la faisabilité, nous avons réalisé un film de vibration sur la surface d'une sonde piézoélectrique vibrant à 40 kHz avec une amplitude de 30 nm (figure 6). Les figures 7a) et 7b) sont des arrêts sur image du film de la surface vibrante imagée (zone sur la figure 6). Nous pouvons observer que la sonde n'a pas un mouvement de piston (une surface plane qui se translate), mais que la surface se déforme légèrement suivant le mode fondamental de vibration. Cette vidéo, couplée à l'imagerie haute fréquence sur des cibles peu coopérantes valide la faisabilité d'une détection d'un signal PA sur de la peau humaine.

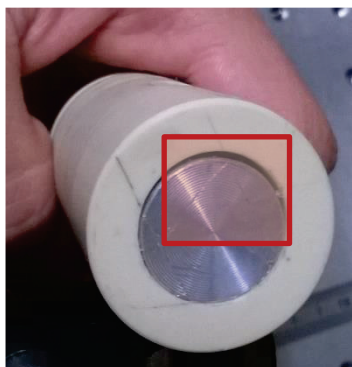


Figure 6 : sonde piézoélectrique et la zone filmée

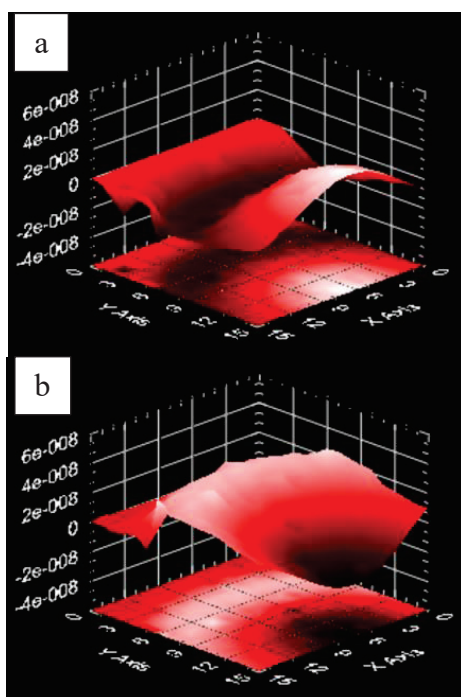


Figure 7 : Arrêt sur image d'une vidéo de vibration de la sonde piézoélectrique à 40 kHz

5. Conclusion

Au regard des résultats préliminaires obtenus aussi bien sur des vibrations 1D que 2D, la technique LOFI semble être prometteuse pour la détection d'ondes acoustiques en surface, et donc pour détecter du signal photoacoustique (vibrations de petites amplitudes à hautes fréquence sur une surface peu réfléchive). Expérimentalement, nous sommes capables à ce jour de détecter des amplitudes de vibrations subnanométriques à des fréquences de l'ordre de la centaine de kHz sur des surfaces peu réfléchissantes. Nous nous attendons à pouvoir détecter des amplitudes de l'ordre de la dizaine de nm à des fréquences de l'ordre du MHz.

Le travail futur va consister à appliquer le LOFI à la détection de signal photoacoustique et également à comparer les performances du LOFI à une technique plein champ. En effet, la méthode LOFI présente l'inconvénient de réaliser les images point par point ;

c'est pourquoi nous développons en parallèle une technique plein champ basée sur un montage shearographique.

Bibliographie

1. Lihong V. Wang and Song Hu, "Photoacoustic Tomography: In Vivo Imaging from Organelles to Organs", *Science*, vol. 335, pp. 1458 (2012)
2. Paul Beard, "Biomedical photoacoustic imaging", *Interface Focus*, vol.1, pp. 602-631 (2011)
3. K. Otsuka, "Self-Mixing Thin-Slice Solid-State Laser Metrology", *Sensors*, vol. 11, pp.2195-2245, (2011)
4. E. Lacot, R. Day, F. Stoeckel, Laser optical feedback tomography, *Opt. Lett.* Vol.24, pp.744, (1999)
5. K. Otsuka, K. Abe, J.Y. Ko, and T.S. Lim, "Real-time nanometer vibration measurement with self-mixing microchip solid-state laser," *Opt. Lett.* 27, 1339-1341 (2002)
6. V. Muzet, E. Lacot, O. Hugon, Y. Guillard, "Experimental comparison of shearography and laser optical feedback imaging for crack detection in concrete structures," *Proc. SPIE* 5856, 793 (2005)
7. O. Jacquin, E. Lacot, W. Glastre, O. Hugon, H. Guillet de Chatellus, "Experimental comparison of autodyne and heterodyne laser interferometry using a Nd:YVO4 microchip laser," *J. Opt. Soc. Am. A* 28, 1741 (2011)
8. E. Lacot, O. Jacquin, G. Roussely, O. Hugon, H. Guillet de Chatellus, "Comparative study of autodyne and heterodyne laser interferometry for imaging," *J. Opt. Soc. Am. A* 27, 2450 (2010)