

Auteur : Simon Chanu--Rigaldies

Directeur de thèse : Thomas Castelain

Encadrants : Pierre Lecomte et Sébastien Ollivier

Titre de la thèse : Interférométrie à Rétroaction Optique pour la Mesure Acoustique et l'Étalonnage de Microphone

Thesis title : Optical Feedback Interferometry for Acoustic Measurement and Microphone Calibration

Mots clés : Interferometre à rétroaction optique / Acoustique / Capteur acousto-optique / Vibromètre optique / Guides d'ondes acoustiques / Etalonnage de microphones / Ondes de choc

Keywords : Optical feedback interferometer / Self-mixing interferometer / Laser feedback interferometer / Acoustic / Acousto-optic sensor / Optical Vibrometer / acoustic waveguides / Microphone calibration / Shock Waves

Résumé :

Ce manuscrit présente une étude de l'Interféromètre à Rétroaction Optique (*Optical Feedback Interferometer*, OFI) comme capteur acousto-optique ainsi que son application à l'étalonnage de microphones. Cet interféromètre présente l'avantage d'être auto-aligné et moins encombrant que des interféromètres plus classiques comme le Mach-Zehnder ou encore le Vibromètre Laser Doppler (*Laser Doppler Vibrometer*, LDV). Les objectifs de cette thèse sont de vérifier s'il est possible de mesurer des pressions acoustiques à l'aide de l'OFI et d'identifier ses limites en tant que capteur acoustique. Dans un premier chapitre, des éléments de la littérature motivant les objectifs de cette thèse sont rappelés. Tout d'abord, les phénomènes acoustiques exploités dans ce manuscrit sont introduits. Il est présenté le modèle de Ciddor, permettant de quantifier l'effet acousto-optique. Enfin, une dernière section de ce premier chapitre est dédiée à la présentation de l'OFI, les équations qui gouvernent son comportement sont détaillées et son exploitation en tant que capteur vibrométrique est expliqué. Les éléments de la littérature traitant de l'OFI comme capteur acousto-optique sont aussi présentés. Le second chapitre est dédié à l'étude de la sensibilité de l'OFI à la pression acoustique. Une relation théorique mettant en évidence la linéarité entre le signal de l'OFI et la pression acoustique d'une onde plane est démontrée à partir des équations gouvernant le comportement de l'OFI. Sa sensibilité est déterminée en comparant les mesures d'un bruit blanc acoustique d'un microphone, d'un LDV et d'un OFI. Ces mesures mettent en évidence l'indépendance de la sensibilité de l'OFI à la fréquence des ondes acoustiques dans la bande de fréquence audible. Dans le troisième chapitre, une méthode d'étalonnage *in situ* de l'OFI est présentée. La méthode d'étalonnage s'appuie sur une mesure vibrométrique de l'OFI permettant de remonter au facteur de rétroaction optique et au facteur de Henry. On résout pour cela un système d'équations non-linéaires permettant de relier la forme du signal vibrométrique à ces paramètres. Cette méthode d'étalonnage est validée à l'aide de simulations numériques. Cette méthode permet dans un second temps d'estimer la pression acoustique d'une onde plane. Un dispositif expérimental permettant de réaliser l'étalonnage de

l'OFI puis de mesurer des pressions acoustiques dans un guide d'onde est présenté. Les résultats obtenus sont, avec un écart relatif maximal de 2 dB, similaires à ceux obtenus avec un microphone pour une onde dont le niveau acoustique est supérieur à 20 Pa. Un dernier chapitre présente une application de l'OFI à la mesure d'ondes de choc et à l'étalonnage de microphones. Une source acoustique permettant d'obtenir des ondes de choc planes à partir de la propagation non-linéaire d'ondes acoustiques est mise en place. Les pressions acoustiques des chocs obtenus sont caractérisées par l'OFI, démontrant ainsi la capacité de ce dernier à mesurer des ondes acoustiques jusqu'à 200 kHz. En comparant les pressions acoustiques mesurées par l'OFI à la tension d'un microphone 1/8" soumis au même champ acoustique, un étalonnage de ce dernier est effectué dans le but d'estimer sa sensibilité et sa réponse en fréquence. On retrouve la sensibilité du microphone avec le même ordre de grandeur que lorsque celui-ci est étalonné avec une méthode de réciprocité. Lorsque le microphone est placé en incidence rasante, la tendance de sa réponse en fréquence est retrouvée avec un écart moyen de 3.5 dB par rapport à un étalonnage effectué par une grille électrostatique corrigée pour prendre en compte l'incidence rasante.

Abstract :

This manuscript presents a study of the Optical Feedback Interferometer (OFI) as an acousto-optic sensor and its application to microphone calibration. This interferometer has the advantage of being self-aligned and less bulky than more conventional interferometers such as the Mach-Zehnder or Laser Doppler Vibrometer (LDV). The aims of this thesis are to verify the ability of the OFI to measure acoustic pressure and to identify its limitations as an acoustic sensor. In the first chapter, some elements of the literature motivating the objectives of this thesis are reviewed. First, acoustic phenomena exploited in this manuscript are introduced. Ciddor's model, which quantifies the acousto-optic effect, is then presented. Finally, a last section of this first chapter is dedicated to introducing the OFI. The governing equations are detailed, and its use as a vibrometric sensor is explained. The literature on the use of the OFI as an acousto-optical sensor is also presented. The second chapter presents a study of the OFI sensitivity to acoustic pressure. Based on the OFI governing equations, a theoretical relationship highlighting the linearity between the OFI signal and the acoustic pressure of a plane wave is demonstrated. The OFI sensitivity is estimated by comparing measurements of acoustic white noise from a microphone, an LDV and an OFI. These measurements demonstrate the independence of the OFI sensitivity from the frequency of acoustic waves in the audible frequency band. In the third chapter, an OFI calibration method is presented. It is based on vibrometric measurement carried out with the OFI, enabling the feedback factor and the linewidth enhancement factor to be determined. A system of non-linear equations is then solved, relating the shape of the vibrometric signal to these parameters. This calibration method is validated using numerical simulations. The method is then used to estimate the acoustic pressure of plane waves. An experimental set-up used for the OFI calibration and acoustic pressure measurements in a waveguide is presented. The results are, with a maximum relative deviation of 2 dB, are similar to those obtained with a microphone when the acoustic level is greater than 20 Pa. A final chapter presents an application of the OFI to shock wave measurement and microphone calibration. An acoustic source generating plane shock waves from the non-linear propagation of acoustic waves is set up. The acoustic pressure of the resulting shocks is characterized by the OFI, demonstrating its ability to measure acoustic

waves up to 200 kHz. By comparing acoustic pressure measured by the OFI with the voltage of a 1/8" microphone exposed to the same acoustic field, the latter is calibrated to estimate its sensitivity and frequency response. The sensitivity of the microphone is found to be of the same order of magnitude as that obtained with a reciprocity method. When the microphone is placed with a grazing incidence, the frequency response is found to have an average deviation of 3.5 dB compared with an electrostatic grid calibration.