

International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

Edited by George Otrio



Télémètre utilisant une diode laser à balayage continu en fréquence et un double interféromètre

Abdeslam Hafidi, Pierre Pfeiffer, Patrick Meyrueis



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570, 1057019 · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326485

TELEMETRE UTILISANT UNE DIODE LASER A BALAYAGE CONTINU EN FREQUENCE ET UN DOUBLE INTERFEROMETRE.

Abdeslam HAFIDI, Pierre PFEIFFER, Patrick MEYRUEIS

Laboratoire des Systèmes Photoniques E.N.S.P.S/U.L.P
Boulevard Sébastien Brant, F- 67400 Illkirch
Tél.: 0388655155, Fax: 0388655160, e-mail: hafidiab@ensps.u-strasbg.fr

RESUME - Nous présentons dans cet article un télémètre laser utilisant une diode laser accordable en longueur d'onde et un double interféromètre de Michelson. L'accord continu en longueur d'onde est assuré par une diode laser à cavité externe. Cette source est utilisée pour alimenter un système interférométrique contenant deux interféromètres dont l'un nous sert de référence. Ce télémètre, utilisé dans les conditions du laboratoire, a permis de mesurer des distances allant de 1m à 10m avec des précisions relatives de l'ordre de 10^{-4} . Nous montrons que cette précision ne dépend essentiellement que de l'étalonnage de l'interféromètre de référence.

ABSTRACT- *We present an interferometric method for absolute distance measurement. This method uses the fact that the wavelength of a laser diode can be tuned continuously, by addition of an external cavity. This laser system is used to feed two interferometers. One of them serves as a reference distance. The optical path difference is obtained from measurement of phase variation. Experimental results are presented. The relative accuracy of 10^{-4} is obtained on distances measured from 1m to 10m. It is shown that this accuracy is essentially limited by the calibration of reference distance.*

1 - INTRODUCTION

Les télémètres existant actuellement se scindent en trois grandes familles suivant la distance à mesurer et la précision de mesure. Dans le cas de grandes distances ($>10^5$ m), la technique de mesure la plus utilisée est la méthode de mesure de temps de vol, connue aussi sous le nom de technique radar. Pour des distances intermédiaires, comprises entre 1m et 1000m, la technique utilisée est celle de modulation de faisceau. Elle est le principe de base de plusieurs appareils de mesure tels que, le geodimeter, E.O.S, mekometer. La troisième technique de mesure c'est celle des télémètres utilisant une méthode interférométrique. Elle est développée pour des petites distances (<1 m). La limite de précision provient surtout de l'effet des perturbations du milieu environnant. Nous nous intéresserons dans cet article à ce dernier type de télémètres, plus particulièrement à ceux utilisant une méthode interférométrique à longueur d'onde variable, appelée aussi méthode interférométrique dynamique car c'est le changement de la longueur d'onde qui provoque la variation de phase et non le déplacement de la cible. Cette méthode de mesure exploite le développement récent des diodes lasers dans de nouvelles configurations telles que Littman [Harv 91] ou Littrow qui les rendent attractives pour des applications de métrologie. Elles possèdent, en effet, des propriétés telles que la stabilité à long terme, une largeur spectrale étroite, donc de grandes longueurs de cohérence et surtout une bonne reproductibilité de longueur d'onde. Il a été démontré que les diodes lasers [Zeid

89. Theil 95] peuvent remplacer les lasers à gaz dans la majorité des applications télématiques. Elles ont, en plus, une puissance de sortie élevée, une grande durée de vie, peu encombrantes, grande efficacité et ne nécessitent pas un grand courant de fonctionnement.

Nous présenterons dans un premier temps le principe de fonctionnement du télémètre et le procédé qui a permis de s'affranchir de toute mesure de longueur d'onde de la source laser utilisée. Nous verrons que cette propriété obtenue en utilisant une distance de référence dans le système interférométrique, impose un autre type de contrainte dans la mesure ou elle nécessite un étalonnage précis de la distance de référence. Nous montrerons que la précision du télémètre dépend essentiellement de celle de la distance de référence. Nous terminerons par le résultat de la mesure expérimentale de la résolution du système sur une distance d'environ 2m.

2 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU TELEMETRE

Le principe de fonctionnement du télémètre repose sur l'utilisation d'une source laser accordable en longueur d'onde. Lors de la mesure on effectue un balayage linéaire en longueur d'onde sur une plage $\Delta\lambda$ pendant une durée Δt . Cette variation de longueur d'onde de la source est convertie par un système interférométrique, comme le montre la figure 1, en une variation de la phase $\Delta\phi$ donnée par:

$$\Delta\phi(t) = \frac{4\pi nD}{\Lambda(t)} = 4\pi nD \frac{\Delta\lambda(t)}{\lambda^2} \quad (1)$$

où $\Lambda(t) = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda(t)}$ est la longueur d'onde synthétique de la source.

$2nD$ correspond à la variation du chemin optique entre les deux bras de l'interféromètre.

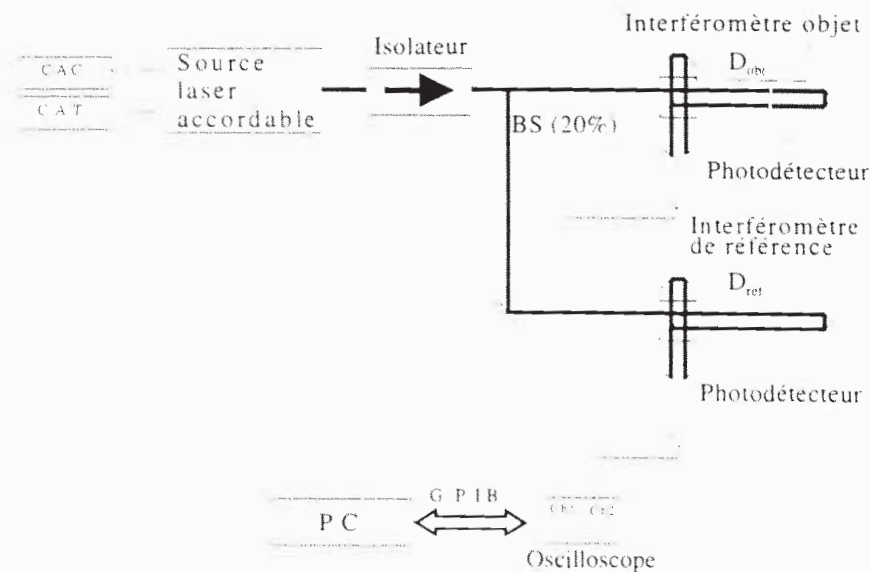


Fig. 1: le montage expérimental utilisé pour la mesure de distance. CAC et CAT sont les circuits de stabilisation de la diode respectivement en courant et en température.

Pour déterminer la valeur de la distance D , il faut alors évaluer la variation de la phase produite par la variation de la longueur d'onde et de mesurer avec précision, respectivement, la valeur de la longueur d'onde λ et de la plage d'accord $\Delta\lambda$. Etant donnée la difficulté de réalisation de mesures précises de ces deux grandeurs et pour éviter l'utilisation d'un dispositif complexe de mesure de longueur d'onde dans notre système, nous avons choisi d'utiliser une distance de référence dans le système interférométrique. Cette solution consiste à employer parallèlement avec la même source laser deux interféromètres (voir figure 1). La différence du chemin optique du premier (interféromètre de référence) doit être connue, stable et sert de référence, celle du second (interféromètre objet) correspond à la distance à mesurer.

En extrayant les variations de phases $\Delta\phi_{obj}$ et $\Delta\phi_{ref}$ issues respectivement des interféromètres objet et de référence, on obtient les expressions suivantes issues de la relation 1 :

$$\Delta\phi_{obj}(t) = \frac{4\pi D_{obj}}{\Lambda(t)} \quad (2)$$

$$\Delta\phi_{ref}(t) = \frac{4\pi D_{ref}}{\Lambda(t)} \quad (3)$$

où D_{obj} et D_{ref} désignent la différence de longueur entre les deux bras de l'interféromètre objet et de référence respectivement. Il est donc aisé de déduire que le rapport des ces deux expressions permet d'exprimer la distance D_{obj} à mesure uniquement en fonction de la variation de la phase et de la distance de référence D_{ref} :

$$D_{obj} = \frac{\Delta\phi_{obj}}{\Delta\phi_{ref}} D_{ref} \quad (4)$$

qu'on peut aussi écrire en tenant compte du fait que les phases ϕ_i peuvent se mettre sous la forme $\phi_i = 2\pi f_i t$:

$$D_{obj} = \frac{f_{obj}}{f_{ref}} D_{ref} \quad (5)$$

Il est donc possible par ce dispositif particulier de s'affranchir de la connaissance de la valeur de la longueur d'onde et de la plage d'accord continue $\Delta\lambda$. Il apparaît alors de la relation 5 que pour déterminer la distance D_{obj} , il suffit de calculer le rapport des fréquences objet et de référence. La valeur de la distance D_{ref} étant donnée par l'étalonnage de l'interféromètre de référence.

3 - INCERTITUDE DE LA MESURE

Une première approche du calcul de l'incertitude de la mesure consiste à différencier la relation 5, ce qui donne:

$$\frac{\Delta D_{obj}}{D_{obj}} = \frac{\Delta D_{ref}}{D_{ref}} + \frac{\Delta f_{obj}}{f_{obj}} + \frac{\Delta f_{ref}}{f_{ref}} \quad (6)$$

L'incertitude relative sur la mesure de la distance D_{obj} dépend donc du dispositif d'acquisition et du traitement du signal et de l'incertitude relative sur la connaissance de la distance de référence. Cette dernière peut se trouver limitée par la stabilité de l'interféromètre face aux vibrations mécaniques et aux variations de température. La conception de l'interféromètre de référence doit donc minimiser

les effet de ces perturbations. Pour réduire par exemple l'effet de variation de la température deux types de solutions sont à envisageables soit séparément soit simultanément. La première consiste à faire appel à des matériaux de très faible coefficient de dilatation thermique pour des températures proches de l'ambiante, tels que certains aciers de grande dureté comme l'Invar ou des matériaux vitrocéramiques (Zerodur) dont le coefficient de dilatation est de l'ordre de 10^{-8} K^{-1} sur une plage de -20°C à $+50^{\circ}\text{C}$. La seconde solution, moins onéreuse mais plus contraignante d'un point de vue technique, consiste à placer l'interféromètre dans une enceinte thermostatée. Le contrôle précis et permanent de température permettra d'assurer la stabilité de l'interféromètre de référence. Une autre contrainte de conception de cet interféromètre porte sur sa taille ou plus précisément sur l'ordre de grandeur de sa différence du chemin optique. En effet le désir de travailler sur un dispositif de mesure compact conduit à limiter la taille de l'interféromètre à quelques dizaines de centimètres, alors que la recherche d'une grande précision relative (10^{-7}) nous pousserait plutôt à la dimensionner pour qu'elle soit proche de la distance à mesurer. Le compromis entre ces paramètres nous a amené à considérer dans notre montage expérimental, un interféromètre de référence usiné sur un bloc d'acier d'environ 30cm. La technique d'étalonnage que nous avons utilisée a permis de mesurer une différence du chemin optique effectivement employée $D_{ref}=18.71 \text{ cm}$. L'incertitude relative $\frac{\Delta D_{ref}}{D_{ref}}$ de mesure établie par cette technique est de $1.8 \cdot 10^{-4}$. Ce résultat est relativement éloigné de ce que nous souhaitons avoir comme référence, car il faudrait utiliser une autre technique plus précise pour l'étalonnage. Néanmoins, l'utilisation de cette référence a permis de valider de manière suffisante notre principe de mesure comme nous allons le voir dans la paragraphe suivant.

4 - RESULTATS EXPERIMENTAUX

4.1 - Source laser

La source laser que nous avons utilisée est une diode laser Sharp GaAlAs, émettant à 780nm en régime monomode. Les circuits d'asservissement (CAC et CAT) permettent de stabiliser respectivement le courant et la température de la diode à 0.1mA et à 0.01degré. Le balayage continu en longueur d'onde est réalisé par la configuration montrée dans la figure2.

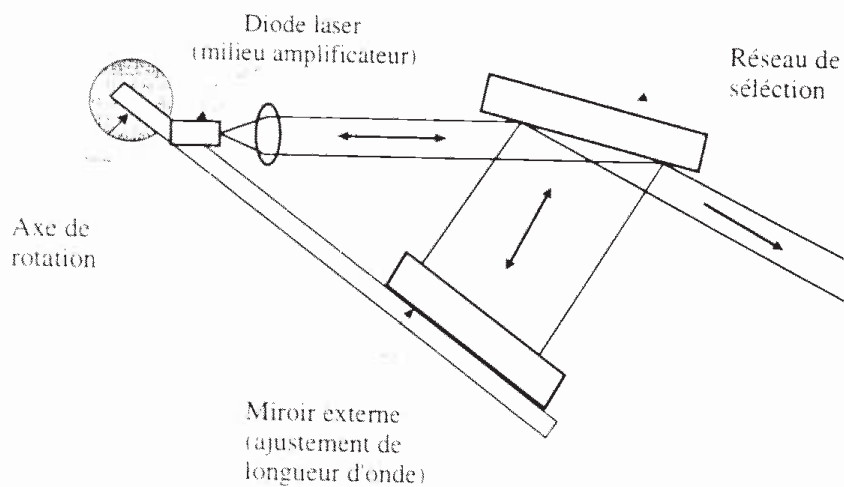


Fig. 2: configuration de la source laser utilisée pour obtenir le balayage continu en longueur d'onde

Les diodes lasers à cavité externe sont composées de trois parties distinguées ayant des fonctions complémentaires: la diode laser sert essentiellement de milieu amplificateur du faisceau laser, le réseau de diffraction sert à la sélection de mode d'oscillation et enfin, le miroir externe permet d'ajuster la longueur d'onde d'oscillation de la source. Pour réaliser un balayage continu, il faut alors changer simultanément la longueur de la cavité et la longueur d'onde sélectionnée par le réseau. Autrement dit, il faut que le miroir puisse effectuer à la fois une rotation et une translation pour garder le même mode sélectionné par le réseau à l'intérieur de sa courbe de sélectivité tout au long de la zone de gain de la diode. La méthode que nous avons retenue, pour réaliser ce mouvement couplé du miroir, consiste à effectuer une simple rotation du miroir autour d'un axe de rotation dont la position est calculée au préalable. Cette technique permet d'augmenter à la fois la plage d'accord continue et de préserver une bonne stabilité mécanique de la source.

Nous avons pu ainsi changer continuellement la longueur d'onde sur une plage de 0.1nm (60GHz) autour de chaque mode longitudinal de la diode. L'étendu de la zone de balayage peut être augmenté en utilisant une diode laser avec traitement antireflet sur sa face de sortie. Les spectres (c), (d) et (e) de la figure 3 montrent le balayage continu effectué par la diode autour du mode (b) avant de sauter au mode longitudinal voisin (a).

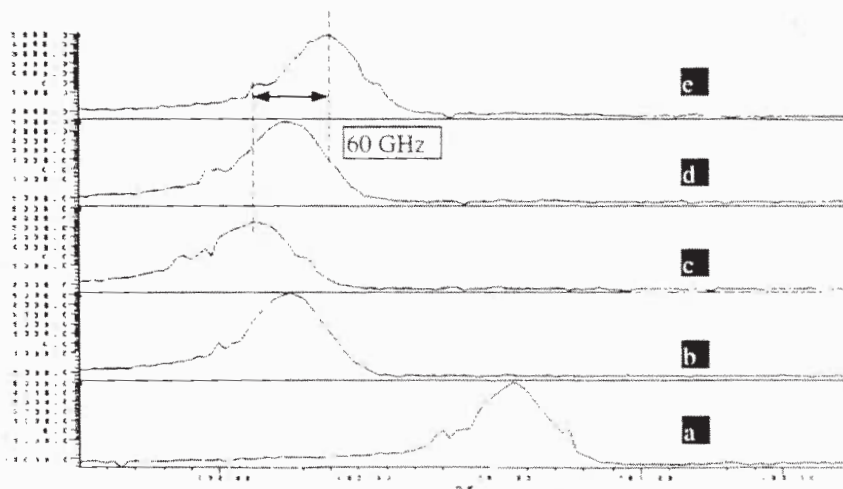


Fig. 3: intensité du spectre à la sortie de la diode (u.a) en fonction de la longueur d'onde (nm). a et b sont les spectres de deux modes adjacents. c, d et e représentent le balayage continu autour du mode b.

4.2 - Résultat des mesures

Le montage expérimentale est montré sur la figure 1. L'isolateur est utilisé à la sortie de la source pour éviter que les réflexions des différents éléments optiques perturbent le fonctionnement de la diode laser. Le faisceau laser est ensuite divisé par une lame séparatrice ayant un coefficient de réflexion de 20% pour que la majorité de la puissance de la source soit dirigée vers l'interférométrie objet. A la sortie des deux interféromètres les faisceaux se recombinaient au niveau des détecteurs. Les signaux interférométriques observés par l'oscilloscope sont stockés dans la mémoire de l'ordinateur via une interface GPIB. Le traitement de ces données permet alors de calculer le rapport des fréquences objet et de référence en utilisant la technique de transformation de Fourier [Tala 96; Suem 91].

Pour mesurer expérimentalement la résolution du télémètre, nous avons monté le miroir objet sur un support mobile permettant de réaliser des déplacements micrométriques de ce miroir. La mesure de

résolution consiste à effectuer un déplacement connu du miroir qu'on devrait retrouver en utilisant notre méthode de mesure. Le résultat de cette expérience est montré par la figure 4. Dans un premier temps, nous avons effectué à titre de comparaison, le même déplacement du miroir de 0.3 mm. Pour chaque position du miroir objet, nous effectuons 5 à 6 mesures pour s'assurer de la répétabilité de la mesure. Dans le cas présenté ici, la distance objet D_{obj} mesuré est 2.4744 m. Le miroir objet est ensuite déplacé d'une quantité de 0.6mm. D'autres mesures effectuées montre que la limite de cette résolution qui est de 0.3mm est imposée par celle de la distance de référence.

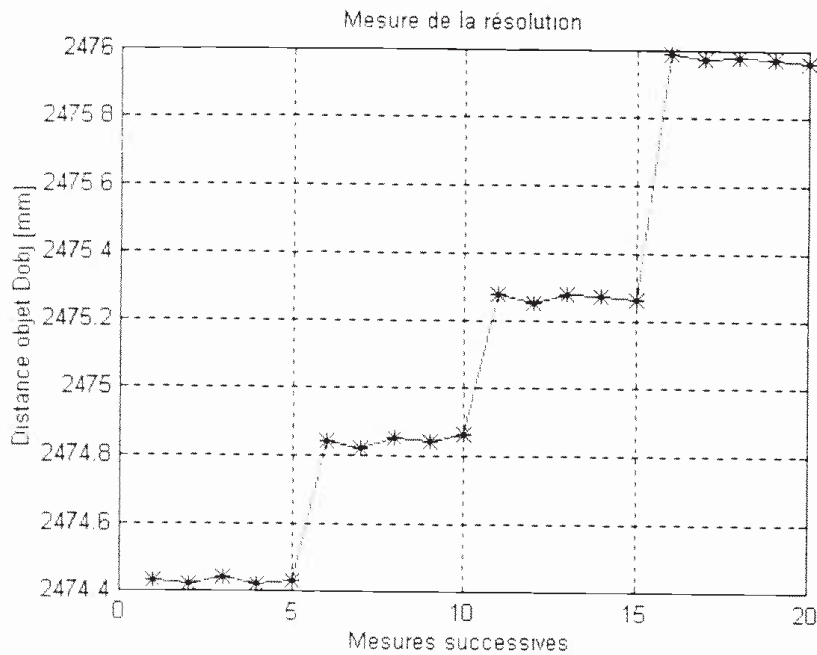


Fig. 4: mesure de déplacement de la distance objet de 0.3 mm et 0.6 mm sur une distance objet de 2.474m

5 - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons pu établir qu'il est possible d'atteindre des mesures précises par un système interférométrique utilisant des diodes lasers à balayage continu en longueur d'onde. Nous avons pu aussi résoudre le problème classique en interférométrie qui est la nécessité d'une mesure précise de la longueur d'onde. La précision de notre méthode de mesure ne dépend donc plus que de la précision de la référence utilisée. La méthode que nous proposons permet de réaliser des mesures sur des distances allant de quelques dizaines de centimètres à des dizaines de mètres.

Notre travail a été mené pour constituer la base d'un instrument de mesure pouvant être embarqué sur satellite. L'application au domaine spatial nécessitera de compléter notre étude notamment par l'évaluation des composants, la mise au point d'un dispositif pour réaliser des mesures sur plusieurs directions, etc. Ceci constituera la suite des travaux présentés dans cet article.

REFERENCES

[Zeid 89] A. Abou-Zeid, "Diode lasers for interferometry" Precision Engineering, vol.11, no 3, pp.139-144, July 1989.

[Suem 91] M. Suematsu et M. Takeda "wavelength-shift interferometry for distance measurements using the fourier transformation for fringe analysis.", Appl. Opt., vol. 30, no. 28, pp.4046-4055, 1991.

[Harv 91]. K. C. Harvy, C. J. Myat. "external cavity diode laser using a grazing incidence diffraction grating" Opt. letters 16, no 12, 1991.

[Theil 95].J.Thiel, T.Pfiefer, and M.Hartmenn. "Interferometric measurement of absolute distances of up to 40m" Measurement 16, pp.1-6, 1995.

[Tala 96]. J.J. Talamonti, R.B. Kay and D.J. Krebs. "Numerical model estimating the capabilities and limitations of the fast Fourier transform technique in absolute interferometry" Apl.opt. 35, No13, pp.2182-2191, 1996.