

## Télémétrie optique jusqu'à 1km par mesure de phase RF

Joffray Guillory<sup>1</sup>, Jorge García-Márquez<sup>1</sup>, Daniel Truong<sup>1</sup>, Christophe Alexandre<sup>2</sup>, Jean-Pierre Wallerand<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Laboratoire Commun de Métrologie LNE-Cnam (LCM), LNE, 1 rue Gaston Boissier, 75015 Paris

<sup>2</sup>Centre d'études et de recherche en informatique et communications (CEDRIC), Cnam, 292 rue S'-Martin, 75003 Paris  
jean-pierre.wallerand@cnam.fr

### Résumé

Nous développons un télémètre basé sur la mesure de la phase accumulée par une onde RF lors de sa propagation dans l'air par un faisceau laser. Dans cet article, le principe du télémètre y est décrit et les principaux résultats présentés. On insistera entre autres sur la manière de s'affranchir simplement du couplage amplitude/phase afin d'améliorer nettement la résolution du système.

### 1. Introduction

Actuellement, pour mesurer des distances à très haute résolution, sous le nm, des interféromètres optiques à comptage de franges sont couramment utilisés. Mais ces systèmes sont limités à des mesures de déplacements à partir d'une position initiale, avec des pas inférieurs au quart de la longueur d'onde optique afin de déterminer l'ordre des franges. Le faisceau optique doit donc suivre en permanence une cible réfléchissante, sans qu'à aucun moment il ne soit interrompu. Pour pallier cet inconvénient, l'interféromètre peut être couplé à un second système qui détermine la distance absolue, un ADM pour Absolute Distance Meter. Parallèlement, notons qu'en environnement extérieur ou industriel difficile, l'interférométrie optique est inefficace dès que les distances à mesurer dépassent quelques dizaines de mètres (dues aux perturbations atmosphériques). Là encore, l'utilisation d'un ADM est nécessaire.

Nous présentons dans cet article le développement d'un ADM pouvant répondre à ces besoins. Celui-ci, basé sur des composants commerciaux largement disponibles afin d'être abordable, doit avoir une exactitude de 5µm à courte portée (quelques dizaines de mètre). En raison des perturbations atmosphériques, une telle exactitude ne peut pas être envisagée à longue portée. Cependant, en développant un système à deux longueurs d'onde, il est possible de compenser les fluctuations de l'indice de réfraction de l'air avec la température [1] et ainsi atteindre une exactitude de 100µm sur 1km. Nous développons donc un tel télémètre dont l'objectif est d'atteindre une exactitude de 10<sup>-7</sup> en relatif.

### 2. Principe de la mesure

Dans l'ADM développé, la distance se détermine à partir de la mesure de la phase accumulée par une onde

Radio Fréquence (RF) qui s'est propagée dans l'air. La propagation en espace libre s'effectue au moyen d'un faisceau optique qui se réfléchira sur une cible avant d'être converti en un signal électrique par un photodétecteur. Dans la pratique, la mesure est réalisée en deux étapes, entre un premier coin de cube placé à proximité du télémètre et un second coin de cube placé à longue distance, à l'emplacement de la cible. Ensuite la différence est convertie en une distance  $D$  de la manière suivante :

$$2 \times D = \left( \frac{\phi}{2\pi} + k \right) \times \Lambda \quad \text{avec} \quad \Lambda = \frac{c}{n \cdot f_{RF}} \quad (1)$$

où  $\phi$  est la différence de phase mesurée entre les deux positions,  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide,  $n$  l'indice de groupe de l'air,  $f_{RF}$  la fréquence de modulation, et  $k$  un nombre entier correspondant au nombre de longueurs d'ondes synthétiques  $\Lambda$  au sein de la distance à mesurer. Ce dernier paramètre est déterminé par un ensemble de mesures à différentes fréquences  $f_{RF}$ .

La résolution sur la distance est fonction de la longueur d'onde synthétique choisie : plus la fréquence de modulation est élevée, meilleure est la résolution. Comme nous utilisons des composants optoélectroniques conçus pour des applications télécom à 10Gbit/s, une porteuse RF à 5.91GHz ( $\Lambda = 5\text{cm}$ ) a été choisie.

### 3. Description du télémètre

La première version de notre télémètre, présentée Figure 1 (à gauche), n'utilise qu'une seule longueur d'onde. Cette porteuse optique, à 1550nm, est émise par un laser DFB (Distributed FeedBack) contrôlée en température. Elle est ensuite modulée en amplitude par une onde RF à 5.91GHz au moyen d'un modulateur à électro-absorption. Après amplification, le signal passe par un coupleur optique 2x2 qui jouera le rôle de circulateur: à ce niveau, le faisceau optique est émis en espace libre puis collimaté afin d'être propagé sur une longue distance. Pour cela un miroir parabolique hors d'axe a été choisi pour réaliser un système achromatique qui permettra la collimation de deux longueurs même très éloignées. Après réflexion sur la cible le faisceau est réinjectée dans la même fibre monomode que précédemment, une opération rendue possible grâce à l'utilisation d'un coin de cube. Néanmoins la réinjection induit au minimum 9dB de pertes optiques. A la sortie du

circulateur le signal optique est détecté par une photodiode en espace libre de type MSM (Metal-Semiconductor-Metal).

A la réception, comme le signal RF à 5.91GHz ne peut pas être directement mesuré par le phasemètre, une conversion vers une fréquence basse de 10MHz a été mise en place. Nous profitons de cette dernière pour effectuer l'amplification RF à fréquence intermédiaire et être moins sensible au couplage amplitude / phase se produisant dans les étages électroniques.

Notons que les composants optoélectroniques et micro-ondes introduisent sur la mesure de phase des dérives à plus ou moins long terme, par exemple en raison de l'évolution de leur température. Pour nous en prémunir, un switch optique a été mis en place juste avant la propagation en espace libre afin de mesurer périodiquement la phase du signal RF sur une liaison optique fibrée de référence dont la distance est fixe. Toutes les variations observées sur cette voie de référence sont interprétées comme des dérives du système (puisque sa distance est censée être fixe) et sont supprimées de la distance mesurée.

#### 4. Résultats expérimentaux

Les distances mesurées ont tout d'abord été comparées à un banc interférométrique de 50m, en intérieur, afin de déterminer l'exactitude de notre instrument. Dans cet environnement contrôlé, nous avons obtenu des écarts entre l'interféromètre (valeur vraie) et notre système allant jusqu'à 25µm.

Nous avons ensuite déterminé la résolution de notre instrument pour des distances allant jusqu'au km. Pour cela le système a été testé en extérieur, en forêt de Montmorency lors d'une journée calme avec un léger vent de 14km/h et un ciel légèrement couvert. La température était d'environ de 10°C.

Afin de déterminer la résolution de notre instrument, nous avons mesuré successivement plus de 7000 points (en moins d'une minute), puis calculé l'écart type sur les valeurs obtenues. Un exemple est donné Figure 2 pour une distance de 410m avec un écart type de 114µm.

Le principal problème rencontré est le couplage amplitude / phase qui se produit dans les étages de réception [2]. En effet, la lumière reçue est soumise à un fort bruit d'intensité lors de la traversée de l'atmosphère en raison de la déviation du faisceau et des phénomènes

de scintillation. Pour contourner cette limitation, nous avons sélectionné les valeurs de distances ayant une même amplitude. Comme notre mesure se compare toujours au chemin de référence, nous ajustons au moyen d'un atténuateur optique variable l'amplitude du signal du trajet de référence à la valeur moyenne du signal du trajet de mesure. Cela garantit que les deux signaux subissent le même couplage amplitude / phase. Au final, cette solution s'avère très efficace : sur la Figure 2, l'écart type est ramené à 12µm. La Figure 1 (à droite) résume l'ensemble de nos résultats : l'écart type croît linéairement avec la distance, jusqu'à 200µm à 1km, mais en ne sélectionnant que les valeurs de distances ayant une amplitude égale au chemin de référence, l'écart type reste toujours inférieur à 15µm.

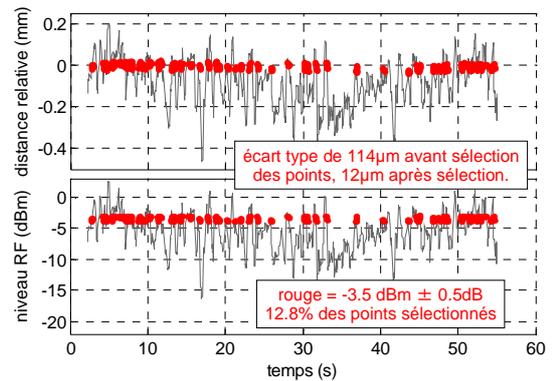


Figure 2. Résultat à 410m : distances relatives et niveaux RF correspondants (données brutes en gris et sélectionnées en rouge).

#### 5. Conclusion

Les résultats obtenus sont très encourageants, 25µm d'exactitude sur 50m et 15µm de résolution sur 1km, mais ils peuvent encore être améliorés en poussant l'intégration et l'automatisation du système (réglage des niveaux de puissance). La prochaine étape consistera à mettre en place la seconde longueur d'onde, à 780nm. Nous pourrions alors déterminer l'exactitude sur 1km.

#### 6. Bibliographie

- [1] K. Meiners-Hagen et al., Meas. Sci. Technol., 19, 2008.
- [2] D.H. Phung, Ph.D. Thesis, UNS, France, 2013.

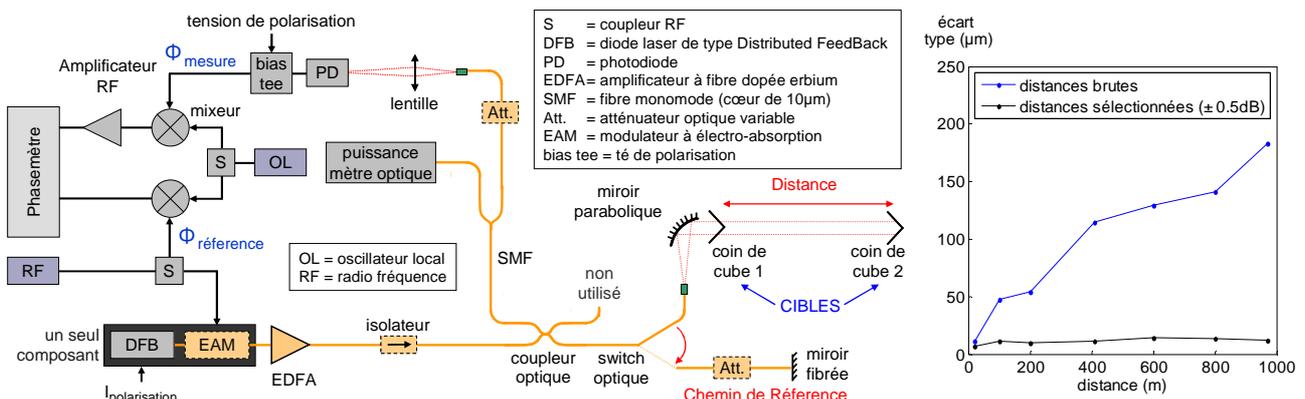


Figure 1. Montage expérimental (à gauche) et résolution du télémètre en fonction de la distance (à droite).