

MESURES MÉCANIQUES

L'interférométrie homodyne reprend ses lettres de noblesse

▼ Si l'interférométrie laser est désormais considérée comme une méthode de référence dans les applications de mesure dimensionnelle, elle a longtemps souffert d'un manque de reconnaissance. Limités par l'électronique de l'époque, les premiers systèmes homodynes manquaient de stabilité et de robustesse. Pour pallier ces limites, on leur a longtemps préféré les systèmes hétérodynes, plus stables mais aussi plus complexes à mettre en œuvre. Mais les progrès accomplis ces dernières années dans l'électronique ont changé la donne. Pour Louis Gonzalez, directeur de Renishaw, il est temps de mettre un terme aux idées reçues et de prouver que les interféromètres homodynes offrent désormais des performances égales, voire supérieures, à celles de leurs concurrents légendaires.

Nous sommes à la fin du XIX^e siècle. A cette époque, de nombreux physiciens croient à l'existence d'un "courant d'éther" à la surface de la Terre. A l'image d'un nageur qui va plus ou moins vite selon qu'il suit le courant d'une rivière ou qu'il la remonte, ils supposent que la lumière se propage plus ou moins vite suivant sa direction par rapport au courant d'éther. Parmi ces physiciens se trouve un certain Albert Abraham Michelson. En 1881, l'Américain

conçoit un montage optique censé démontrer l'existence du courant d'éther. Il sépare la lumière en deux faisceaux qui suivent des chemins optiques de même longueur et de direction différente (l'une "parallèle" au vent d'éther, l'autre en travers). Comme les deux faisceaux arrivent en même temps, Michelson en déduit que l'éther n'existe pas, et que la lumière se propage à la même vitesse dans les deux directions... L'expérience n'est pourtant pas un échec.

Grâce à ce montage, Michelson va fournir à ses successeurs les premiers fondements de la théorie de la relativité, et donner son nom à l'un des plus célèbres instruments de mesure dimensionnelle.

Aujourd'hui encore, l'interférométrie fait référence. Depuis le développement des premiers lasers de métrologie dans les années 60, elle figure au rang des méthodes les plus précises. Les interféromètres laser actuels offrent une incertitude de mesure de l'ordre de 1 µm/m avec des résolutions souvent inférieures au nanomètre. On les utilise notamment dans des applications de mesure dimensionnelle (mesure de distances, de rectitude, de parallélisme...), pour contrôler des angles, des vibrations, pour étalonner des bancs d'essais ou des machines à mesurer.

Vu de loin, le principe est toujours le même. Les interféromètres laser intègrent un jeu de lames semi-réfléchissantes qui permettent de séparer le faisceau émis par la source en un faisceau de référence et un faisceau de mesure (réfléchi par un miroir mobile). Les deux faisceaux interfèrent dans le détecteur. Celui-ci génère des signaux sinusoïdaux qui permettent de calculer la différence de phase entre les deux faisceaux, et donc la distance recherchée.

En pratique, l'affaire n'est pas si simple. Le montage de Michelson a donné naissance à deux variantes : l'interférométrie homodyne (à une fréquence) et hétérodyne (à deux fréquences). L'interférométrie homodyne

est la plus ancienne. Dans ce montage, le faisceau émis par la source est constitué d'une seule longueur d'onde (donc d'une seule fréquence). Lorsqu'il arrive dans l'interféromètre, il est divisé par un miroir semi-réfléchissant en un faisceau de référence et un faisceau de mesure. Le faisceau de référence est renvoyé vers le détecteur avec la même fréquence, tandis que le faisceau de mesure traverse la lame et se réfléchit sur un miroir mobile. Lorsque le miroir est fixe, le faisceau de mesure revient avec la même fréquence vers le détecteur, où il interfère avec le faisceau de référence. Le détecteur, qui n'observe aucun battement entre les deux fréquences, génère alors une tension continue (dont l'amplitude

En bref

- Il existe deux types d'interféromètres laser : les systèmes hétérodynes (à deux fréquences) et les systèmes homodynes (à une fréquence).
- Si le principe est sensiblement le même, les deux méthodes offraient jusqu'à présent des résultats très différents.
- Mais grâce aux progrès accomplis dans l'électronique, les systèmes homodynes ont rattrapé leur retard, et offrent désormais des performances équivalentes, voire supérieures, aux systèmes hétérodynes.



dépend de la différence de phase entre les deux signaux).

Lorsque le miroir se déplace, en revanche, la fréquence du faisceau de mesure est modifiée (c'est l'effet Doppler). Le détecteur observe alors un battement dont la fréquence est d'autant plus élevée que la vitesse de déplacement du miroir augmente.

Les variations d'intensité dues aux interférences entre les deux faisceaux se traduisent, en sortie du circuit détecteur, par deux sinusoides en quadrature. Pour comprendre la manière dont elles permettent de mesurer le déplacement du miroir, il faut s'imaginer que l'on représente l'évolution de ces si-

gnaux sur un oscilloscope en mode (X, Y). On obtient alors une courbe de Lissajous en forme de cercle. Lorsque le miroir se déplace, le spot décrit un certain nombre de tours. L'angle qu'il fait avec l'horizontale matérialise la différence de phase ϕ entre les deux signaux, tandis que le cosinus et le sinus de l'angle représentent leurs amplitudes I_1 et I_2 . On peut alors calculer la phase ϕ entre les deux signaux ($\phi = \arctan(I_2/I_1)$). Le sens de rotation du spot indique quant à lui si le miroir s'éloigne ou se rapproche.

Par ailleurs, on sait que les franges claires et sombres d'une figure d'interférences se succèdent avec une période d'une demi-longueur d'onde.

tronique analogique intégrée est encore jeune. Les problèmes de dérive des premiers amplificateurs à courant continu nuisent à la stabilité du signal et aux performances de la méthode. De plus, les résultats sont sensibles aux variations de la lumière ambiante (qui affectent la composante continue du signal) et à l'intensité du signal (qui est d'autant plus difficile à amplifier que l'on travaille en courant continu, avec un bruit relativement important).

C'est pour pallier ces inconvénients qu'apparaissent, en 1970, les premiers **interféromètres hétérodynes**. Le faisceau incident est dans ce cas constitué de deux fréquences (F_1 et F_2) dont la combinaison génère un battement. Comme dans l'interférométrie homodyne, un miroir semi-réfléchissant sépare les faisceaux en deux. Le premier (F_1) est réfléchi vers le détecteur où il se recombine avec le faisceau F_2 . A l'issue de cette recombinaison, le détecteur "voit" $F_2 - F_1$. Le deuxième (F_2) traverse le miroir, rencontre le réflecteur mobile et retourne vers un deuxième détecteur où il est mélangé avec F_1 .

En l'absence de mouvement, ce détecteur "voit" aussi $F_2 - F_1$. Lorsque le miroir de mesure se déplace, la fréquence du faisceau F_2 varie par effet Doppler. Si l'on considère qu'elle varie de $\pm \delta F$ (le signe dépend du sens de déplacement du miroir mobile), le faisceau arrivant dans le deuxième détecteur



Dans de nombreuses applications, l'interférométrie laser fait référence. On l'utilise notamment pour mesurer des distances, des angles, contrôler des vibrations, ou même étalonner des bancs d'essais et des machines à mesurer.

gueur d'onde. Lorsque le spot décrit un tour complet de 360° , le miroir s'est donc déplacé d'une demi-longueur d'onde, soit environ $0,3165 \mu\text{m}$. Par une simple règle de trois, on peut alors à tout instant relier la valeur de la phase ϕ au déplacement du miroir.

Il est ensuite possible d'obtenir des résolutions meilleures qu'une demi-longueur d'onde en utilisant un phasemètre de précision (ou interpolateur). Le principe consiste à saisir simultanément la valeur du sinus et du cosinus, à déterminer le "cadrant" dans lequel se situe le point mesuré, puis à calculer la valeur de l'angle à l'intérieur du quadrant...

Une mesure délicate

Si la méthode homodyne est aujourd'hui couramment utilisée, elle a longtemps souffert d'un manque de reconnaissance. Il faut dire que lorsque les premiers interféromètres voient le jour dans les années 65, l'élec-

Il y a laser et laser

De nombreuses applications de mesure dimensionnelle utilisent des lasers sans pour autant être basées sur l'interférométrie. Dans ce cas, on utilise la capacité du laser à générer un faisceau de diamètre constant sur de longues distances. Ces dispositifs exploitent le plus souvent des calculs de triangulation. D'autres systèmes fonctionnent par détection de coupure de faisceau, ou encore par ombroscopie. Dans ce cas, les détecteurs ne sont pas des diodes photoélectriques générant des sinusoides en quadrature, mais des PSD (*position sensing devices*) ou des cellules CCD (*charge coupled devices*).

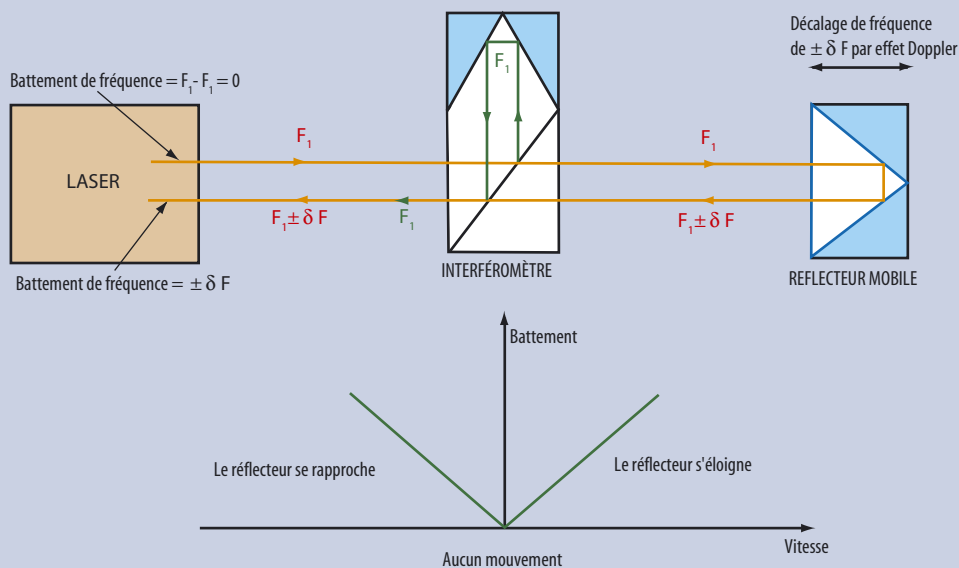
Il existe aussi des lasers de poursuite (*laser tracker*) dans lesquels la distance entre la tête du laser et l'optique de renvoi est parfois mesurée par interférométrie. Néanmoins la précision obtenue n'est pas celle d'un interféromètre classique. Comme l'interféromètre est dans la tête du système (avec le laser), le trépied de support et le sol font aussi partie de la chaîne métrologique, et doivent être pris en compte dans le calcul de l'incertitude...

LG

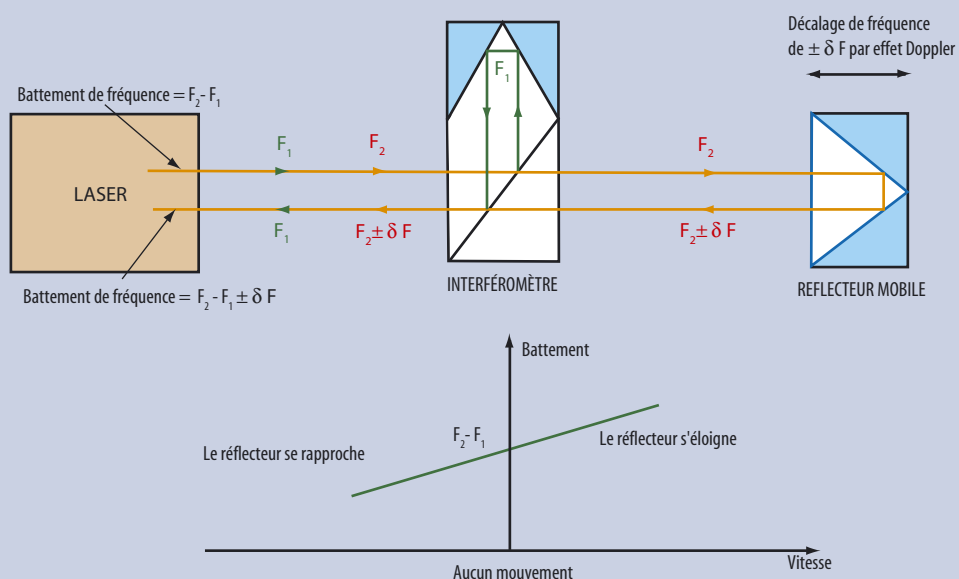


Deux modes de détection

Détection homodyne



Détection hétérodyne



gène une nouvelle fréquence de battement $F_2 - F_1 \pm \delta F$.

La comparaison des signaux issus des deux détecteurs permet de déduire la variation de fréquence δF , autrement dit le nombre de fois que la phase "tourne" de 360° . Sachant qu'un tour complet correspond à un déplacement d'une demi-longueur d'onde, on en déduit alors la distance parcourue par le miroir mobile.

Contrairement à l'interférométrie homodyne (dans laquelle on mesure la phase en comparant les intensités de deux signaux

sinusoïdaux), l'interférométrie hétérodyne est basée sur le comptage électronique d'une fréquence. Du coup, elle présente de nombreux avantages. Elle est moins sensible à la stabilité de la phase, elle ne nécessite pas de disposer de moyens de mesure de tension de haute précision, ni de générer des signaux sinusoïdaux en quadrature à la sortie du détecteur. De plus, les systèmes hétérodynes travaillent à plus haute fréquence, autrement dit dans des domaines pour lesquels les amplificateurs opérationnels ne posent pas de problème de dérive.



L'interférométrie laser figure au rang des méthodes les plus précises. Avec son laser homodyne ML10 Gold, Renishaw garantit une incertitude de mesure de l'ordre de 0,7 micromètre à 1 mètre.

Pour obtenir une meilleure résolution, on n'utilise pas un phasemètre mais un système multiplicateur de fréquences qui permet de subdiviser l'onde reçue.

La fréquence du faisceau de référence ($F_0 = F_2 - F_1$) et celle du faisceau mesurant ($F_m = F_2 - F_1 \pm \delta F$) alimentent en fait deux compteurs qui sont lus et remis à zéro périodiquement. La différence entre les valeurs lues, qui donne la distance parcourue pendant la période, incrémente ou décrémente le compteur de l'affichage. En se limitant à cette méthode, la résolution de l'affichage ne serait que d'une demi-longueur d'onde (soit $0,315 \mu\text{m}$).

Pour augmenter la résolution, imaginons que l'on asservit à F_0 et F_m deux générateurs de fréquences seize fois plus élevées. On obtient alors F_{016} et F_{m16} . Grâce à des boucles de contrôle de phase, ces générateurs recopient parfaitement les déplacements du mobile, y compris les plus petits d'entre eux. Il ne reste plus qu'à compter les fréquences F_{016} et F_{m16} avec la méthode précédente pour que la résolution du compteur devienne seize fois plus élevée ($0,315 / 16 = 0,0196 \mu\text{m}$).

Il reste malgré tout une limite de taille. Rappelons qu'en l'absence de mouvement, la fréquence du faisceau de référence F_0 est égale à la fréquence du faisceau mesurant F_m (de l'ordre de 2 MHz). Lorsque le miroir de mesure se déplace, la fréquence F_m varie de $\pm \delta F$ (selon le sens du déplacement). Si l'on traite des signaux dont la fréquence est supérieure à 2 MHz dans le sens des déplace-

ments négatifs, la résultante ($F_2 - F_1 - \delta F$) est nulle. En pratique, cette valeur correspond à une limite dans la vitesse de déplacement (dans cet exemple :

$2.10^6 \times 0,315 = 630\,000 \mu\text{m/s}$ soit $0,6 \text{ m/s}$). Autre contrainte, les lasers hétérodynes doivent générer un faisceau doté de deux fréquences différentes. Pour cela, il existe des solutions relativement délicates à mettre en œuvre. L'asservissement par effet Zeeman, par exemple, est une technique courante et efficace, mais elle nécessite d'utiliser un aimant de forte puissance dans la tête du laser. De plus, les deux fréquences obtenues sont en général très proches (de 2 MHz), ce qui limite d'autant plus la vitesse de déplacement. On peut aussi asservir la fréquence à l'aide d'un modulateur acousto-optique, mais sa présence induit des variations de température susceptibles d'entraîner une dérive du signal.

L'homodyne reprend la tête de la course

Malgré ces limites, les systèmes hétérodynes ont longtemps dominé le marché de l'interférométrie laser. Face aux problèmes de stabilité des systèmes homodynes, ils apparaissaient bien souvent comme l'unique moyen d'obtenir une mesure interférométrique précise et fiable. Mais les progrès réalisés ces dernières années dans le domaine de l'électronique et du traitement numérique du signal ont changé la donne. Les amplificateurs opérationnels offrent désormais une large bande passante et ne posent plus aucun problème de dérive en courant continu. Les interféromètres homodynes gagnent donc en stabilité, en précision, et certains s'offrent même de nou-

velles astuces pour concurrencer la méthode hétérodyne.

C'est le cas par exemple des interféromètres de la société Renishaw. Leur principe est celui de la détection homodyne, mais avec une variante originale : au lieu de mesurer les variations d'intensité d'un faisceau ponctuel plus ou moins lumineux, le détecteur analyse directement les franges d'interférences. Pour cela, un composant optique spécifique est rajouté à l'architecture classique. Il permet en quelque sorte d'obtenir un "décalage" des faisceaux incidents et de projeter directement la figure d'interférences à la surface des cellules photosensibles. Résultat, un plus grand nombre de cellules sont illuminées simultanément, et la sensibilité de la méthode s'en trouve améliorée...

Autre particularité, le système intègre un convertisseur analogique numérique et une mémoire qui permettent de traduire directement les signaux sinusoïdaux obtenus à la sortie du détecteur en valeurs de déplacement. Pour cela, les signaux analogiques sont d'abord numérisés à haute vitesse (les convertisseurs utilisés offrent une fréquence d'échantillonnage de 100 MHz avec une résolution de 12 bits), puis transmis à la mémoire qui associe chaque valeur de sinus et de cosinus à un angle, donc à un déplacement en microns (sachant toujours qu'un tour de 360° correspond à une demi-longueur d'onde). L'amplitude du signal, quant à elle, correspond au rayon du cercle tracé par le spot. Grâce à cette méthode, Renishaw garantit une incertitude de mesure particulièrement faible (de l'ordre de 0,7 micromètre à 1 mètre pour le laser homodyne ML10 Gold).

Rappel

Lorsque deux sources ponctuelles monochromatiques génèrent des interférences, l'intensité de l'onde résultante est différente de la somme des intensités des ondes qui la composent.

Considérons par exemple deux sources qui suivent un chemin optique de longueur différente. Si δ est la différence de marche entre les deux chemins, on constate que les régions où δ est un nombre entier de longueur d'onde ($\delta = k \times \lambda$) présentent un maximum de lumière correspondant aux franges brillantes. On dit que les ondes sont en phase, ou qu'elles se superposent de manière constructive.

Les régions où la différence de marche est un nombre impair de demi-longueur d'onde ($\delta = (2k+1) \times \lambda/2$) présentent un minimum de lumière et correspondent aux franges sombres. On dit qu'elles sont en opposition de phase, ou qu'elles se superposent de manière destructive.

MLZ

Les interféromètres homodynes actuels permettent aussi d'éliminer la composante continue du signal. Le modèle RLE10 de Renishaw, par exemple, intègre un photodétecteur spécifique qui génère quatre sorties sinusoïdales déphasées (sinus, cosinus, $1/\text{sinus}$ et $1/\text{cosinus}$). La combinaison des signaux en opposition de phase permet d'isoler la composante continue et de la soustraire. On s'affranchit ainsi de l'influence de la lumière ambiante et des variations d'intensité du faisceau.

Contrairement aux systèmes hétérodynes, les interféromètres homodynes actuels permettent aussi de délivrer le faisceau laser au plus près du point de mesure au moyen d'une fibre optique. Cette particularité provient d'une différence de taille dans la conception des deux types d'interféromètres. Dans un système homodyne, le faisceau laser n'est partagé que lorsqu'il parvient à l'interféromètre. Dans le cas d'un système hétérodyne, en revanche, il est déjà partagé dans le laser (ou dans le modulateur acousto-optique). Il est donc sensible à la nature du milieu qu'il traverse avant d'arriver à l'interféromètre. Dans ce cas, l'emploi d'une fibre optique est difficile (à moins d'utiliser une fibre qui préserve la polarisation et d'ajouter un photodétecteur supplémentaire pour retrouver la fréquence de battement du faisceau incident à la sortie de la fibre). Un système homodyne, en revanche, facilite le montage et l'alignement du faisceau.

Louis Gonzalez
Renishaw



Les interféromètres homodynes actuels permettent de délivrer le faisceau laser au plus près du point de mesure au moyen d'une fibre optique.