

sommaire :

■ Pascal BESESTY

Laboratoire d'Électronique, de technologie et d'Instrumentation
Commissariat à l'Énergie Atomique

Le télémètre à laser puce est un système optique de mesure de distance sans contact utilisant un émetteur laser solide miniature monolithique. Cette source laser permet d'avoir une grande directivité et de sélectionner avec une grande précision les objets que l'on veut mesurer

Présentation

Un télémètre à laser est un dispositif qui permet d'effectuer des mesures de distance ou de vitesse sans contact, avec une grande résolution spatiale. Les premiers télémètres à laser ont été développés pour des applications militaires, puis sont devenus des outils de mesure de distance, de vitesse dans de nombreuses applications industrielles. Le fait d'utiliser une source laser permet d'avoir une grande directivité du faisceau optique du télémètre. Cela permet de sélectionner avec une grande précision les objets que l'on veut mesurer. On peut aisément imaginer de déplacer continûment le faisceau optique du télémètre suivant des lignes verticales et horizontales, puis obtenir par exemple la cartographie en trois dimensions des objets.

Comme le montre la [figure 1](#) , et de façon générale, tous les **télémètres à laser** sont constitués :

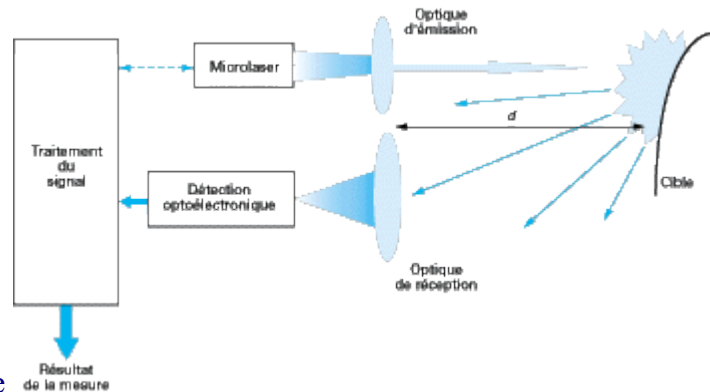


Figure 1 - Synoptique d'un télémètre à laser puce

- d'une source d'émission laser ;
- d'une optique d'émission ;
- d'une optique de réception ou de collection du flux réémis par la cible ;
- d'un dispositif de détection optoélectronique ;
- d'un dispositif de traitement du signal plus ou moins compliqué en fonction de la technique de détection et des grandeurs à mesurer.

Télémètre à laser puce

Ce qui différencie un télémètre à laser puce d'un autre télémètre c'est l'utilisation d'un laser solide miniature monolithique comme source d'émission laser. Ce laser solide miniature est communément appelé **microlaser** , **laser puce** ou **microchip laser** dans la langue de Shakespeare et sera présenté paragraphe 3 ([tableau 1](#)).

Principe de mesure d'un télémètre à laser puce

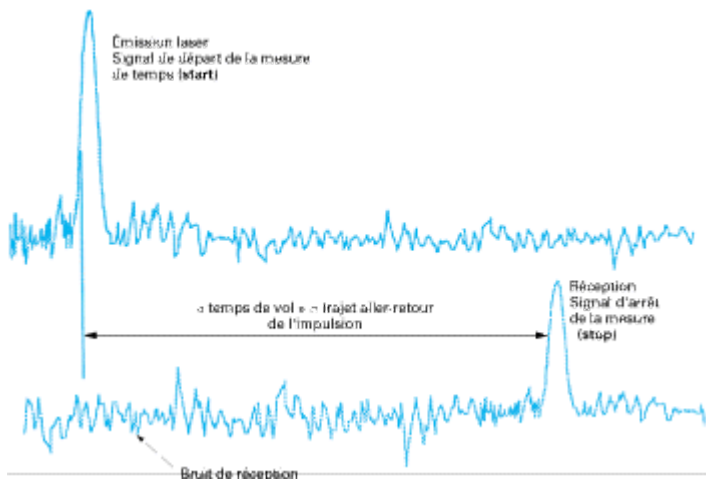
Nous pouvons observer deux principes de mesure, dépendant du type de modulation réalisée par le microlaser pour constituer l'émetteur :

1. **modulation d'amplitude** réalisée par un microlaser impulsionnel qui permet d'appliquer la méthode de télémétrie dite du « temps de vol » ;
2. **modulation de fréquence optique** réalisée par un microlaser continu modulé en fréquence qui permet d'effectuer une détection cohérente.

Ø [Figure 1](#) - Synoptique d'un télémètre à laser puce

Ø [Figure 2](#) - Temps de vol : principe

Figure 2 - Temps de vol : principe



Téléométrie temps de vol

■ Principe [1] [2]

Le principe du temps de vol est donné [figure 2](#).

La téléométrie temps de vol consiste à émettre une impulsion lumineuse sur la cible et à déterminer le temps du trajet aller et retour de cette impulsion. Cela se traduit par la mesure de l'intervalle de temps qui sépare l'émission de l'impulsion en sortie du laser (signal de **start** ou départ de la mesure de temps) et de détection par le circuit de réception (signal de **stop** ou fin de la mesure de temps). On peut, ainsi, déterminer la **distance** séparant le **téléomètre de la cible** en connaissant la vitesse de la lumière :

$$d = \frac{T_v}{2} C \quad (1)$$

avec T_v temps de vol (trajet aller retour de l'impulsion lumineuse)

C vitesse de la lumière.

• La **précision de la mesure** est donnée par l'écart-type :

$$\sigma_d = \frac{t_r}{2,36 \text{ SNR}} \quad (2)$$

avec t_r temps de montée de l'impulsion

SNR rapport signal sur bruit hors de la mesure.

Cette formule est contradictoire, car en effet on pourrait penser que le fait d'avoir un **temps de montée** d'impulsion le plus faible possible, donc de fréquence plus élevée, devrait nous permettre d'augmenter la précision du téléomètre. Mais il faut prendre en compte que le rapport signal sur bruit (SNR) est directement proportionnel à la bande passante du système de détection qui devra être augmentée pour pouvoir accepter ces plus hautes fréquences. Dans tous les cas, il faudra trouver un compromis pour l'optimisation des performances du téléomètre.

x D'autre part, le **rapport signal sur bruit** dépend de la distance téléomètre cible (d), car, dans presque tous les cas, l'émetteur laser du téléomètre envoie une puissance optique optimale P_e et le dispositif de réception d'aire a détecte des puissances P_r très fortement atténuées par la nature de la cible (r) et le temps de transmission dans l'atmosphère T_r comme le montre l'**équation du LIDAR** :

- dans le cas où la taille du faisceau laser est comprise dans la surface de la cible :

$$P_r = P_e \frac{a}{\pi d^2} \rho T_r \quad (3)$$

- dans le cas où la taille du faisceau laser n'est pas comprise dans la surface S de la cible :

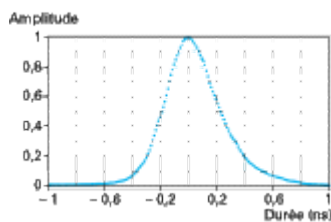
$$P_r = P_e \frac{4 a S}{\pi^2 d^4 O^2} \rho T_r \quad (4)$$

avec O ouverture de l'optique de réception.

■ Émetteur laser impulsionnel [3] [4] .

- En considérant les deux relations (3) et (4) , pour avoir un télémètre à laser performant il faut disposer d'une source laser bien adaptée aux caractéristiques de l'application. On peut prendre en compte les critères suivants :
 - la **gamme de mesure** est liée à la puissance de l'émetteur et au respect de la sécurité oculaire ;
 - la **précision** est définie comme nous l'avons vu par les caractéristiques temporelles de l'impulsion ; la [figure 3](#) donne un exemple d'impulsion obtenue à partir d'un microlaser YAG.
 - la **compacité** et le **coût du dispositif** .

Figure 3 - Impulsion obtenue à partir d'un microlaser YAG

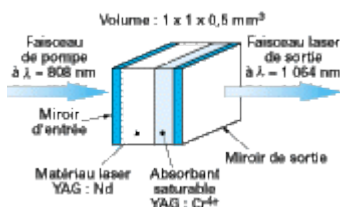


C'est pour ces raisons que des microlasers ou lasers puces sont employés dans les télémètres.

Ø [Figure 3](#) - Impulsion obtenue à partir d'un microlaser YAG

Ø [Figure 4](#) - Microlaser YAG:Nd

Figure 4 - Microlaser YAG:Nd



- Les microlasers sont des lasers solides dont la longueur d'onde varie avec le matériau à gain (c'est-à-dire le matériau laser dopé avec des ions actifs) utilisé dans leur fabrication. Exemple

Si l'on utilise le YAG:Nd, l'émission se situe à 1,064 μm et si l'on utilise le verre codopé erbium-ytterbium (Er+Yb) elle se situe autour de 1,55 μm.

- Nous nous attacherons essentiellement au fonctionnement des microlasers avec un **déclenchement passif**. Il repose sur la présence, à l'intérieur de la cavité, d'un absorbant saturable ([figure 4](#)), qui va déclencher les pertes de la cavité. En effet, sa transmission change en fonction de l'intensité du faisceau lumineux qui le traverse. Le développement d'une impulsion laser n'est possible que lorsque l'absorbant est transparent et le milieu à gain peut alors se vider de l'énergie emmagasinée sous forme d'une impulsion géante de courte durée temporelle. L'apparition de cette impulsion se répétera de nouveau à chaque fois que l'énergie emmagasinée dans la cavité du microlaser est suffisante pour faire changer d'état l'absorbant saturable.

La mise en forme du faisceau optique de sortie n'est pas toujours nécessaire, car le microlaser produit un faisceau parfaitement circulaire avec une divergence naturelle de ± 5 mrad. Cette particularité permet de simplifier l'optique de mise en forme pour produire un émetteur de bonne qualité.

Pour assurer le fonctionnement du microlaser, il faut alimenter en photons le matériau à gain avec une diode laser de pompe dont l'émission est adaptée en longueur d'onde à la fenêtre d'absorption du milieu à gain, par exemple $0,808 \mu\text{m}$ pour le YAG.

Le contrôle de la puissance d'injection dans le microlaser permet de contrôler la fréquence de récurrence des impulsions laser en sortie du microlaser.



Circuit de réception

Comme nous l'avons vu ([figure 2](#)), il est nécessaire de détecter l'instant de retour (signal de *stop*) du flux rétrodiffusé par la cible.

Le rapport du flux rétrodiffusé par rapport au bruit de la réception permet de déterminer le **facteur de signal sur bruit** (SNR). Pour *améliorer* ce paramètre et compte tenu que le facteur d'atténuation (ou dynamique) entre la puissance crête émise et celle reçue par la réception est très importante (10^{-12}), on utilise des *photodétecteurs avalanche*. Ces photodiodes avalanche apportent un gain d'environ 40 dB sur le signal détecté.



Traitement du signal

À partir d'un signal de *start* produit par l'instant d'émission de la lumière et d'un signal de *stop* produit par le circuit de réception ([figure 2](#)), on détermine la durée du trajet de l'impulsion lumineuse entre la cible et le télémètre (temps de vol).

Cette mesure de temps de vol est réalisée par un chronomètre. Pour obtenir cette mesure plusieurs techniques existent.



- La méthode la plus courante est l'accumulation du nombre de périodes d'une horloge haute fréquence pendant l'intervalle de temps compris entre le *start* et le *stop*. Les **limitations** de cette technique sont la consommation des circuits électroniques haute fréquence et l'utilisation d'horloges haute fréquence pour avoir une précision importante sur la mesure.

Exemple

Une précision de 1 cm correspond à un temps de vol de 66 ps et il faudra utiliser une horloge supérieure à 15 GHz pour garantir cette précision.

- La seconde méthode est une méthode d'interpolation qui supprime l'emploi de hautes fréquences pour le comptage et qui permet l'intégration de cette électronique dans un ASIC (Application Specific Integrated Circuit) avec l'emploi d'une fonderie en technologie BICMOS (transistors bipolaires et circuit CMOS).

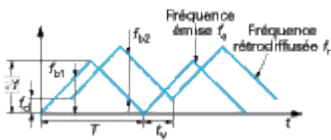
Grâce à l'utilisation d'un tel ASIC, le télémètre peut être très compact, faible consommateur en énergie et d'un coût réduit.

Télémétrie à détection cohérente [3] [4]

Principe de la mesure de télémétrie FMCW (ou à détection cohérente)

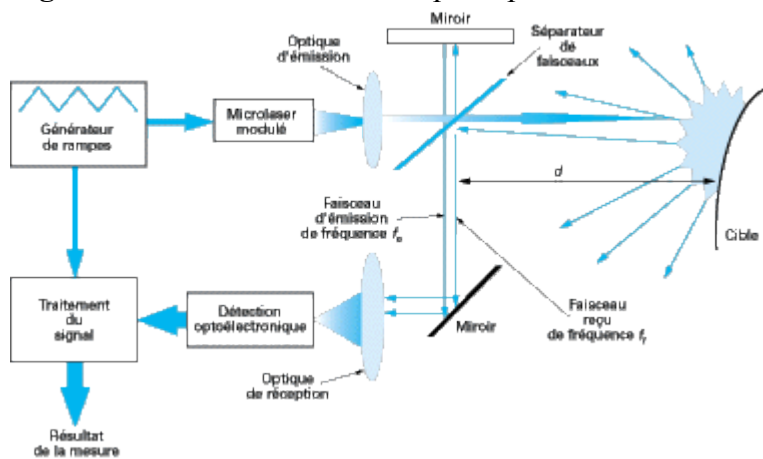
La technique est identique au principe du radar FMCW (*Frequency Modulated Continuous Waves*), mais on utilise ici, comme émetteur, un laser dont on module la fréquence optique (LIDAR à détection cohérente ou hétérodyne). La mesure de la distance et de la vitesse sont effectuées grâce à la détection de la différence des fréquences optiques entre l'émetteur laser et le récepteur ([figure 6](#)) qui sont produites par le trajet aller-retour de l'onde lumineuse ou le déplacement de la cible (effet Doppler).

Figure 6 - Synoptique d'une détection cohérente



Ø **Figure 5** - Détection cohérente : principe

Figure 5 - Détection cohérente : principe



La fréquence f_e d'un microlaser accordable est modulée par un signal triangulaire de période T ([figure 5](#)). La lumière cohérente de fréquence f_e émise par le microlaser est divisée par un séparateur de faisceau ([figure 6](#)) en deux parties :

- l'une est transmise vers la cible, où elle est rétrodiffusée par la cible avec une fréquence f_r ;
- la seconde de fréquence f_e est renvoyée vers le détecteur où elle se recombine avec l'onde rétrodiffusée par la cible de fréquence f_r .

L'intensité de l'onde recombinaison ou d'interférence (détection hétérodyne) est détectée par le récepteur. Cette intensité varie en temps, proportionnellement au battement en fréquence, causé par la différence de trajet entre la cible et l'émetteur (t_v), et par l'effet Doppler (f_d).

La mesure des fréquences de battement f_{b1} et f_{b2} ([figure 5](#)) permet de déterminer la distance d et,

simultanément, la vitesse v de la cible.

L'obtention de d et de v est immédiat à partir des relations suivantes :

$$f_{b1} = \Delta f \frac{2d}{cT} - \frac{2v}{\lambda} \quad (5)$$

$$f_{b2} = \Delta f \frac{2d}{cT} + \frac{2v}{\lambda} \quad (6)$$

avec D excursion de la modulation
 f optique

λ longueur d'onde de l'émetteur.

Si l'on pose $v = 0$, on peut calculer l'**incertitude sur la mesure de distance** :

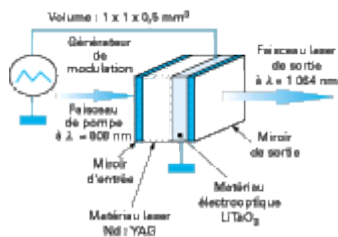
$$\delta d = \frac{cT}{2\Delta f} f_b \quad (7)$$

avec $f_b = f_{b1} = f_{b2}$.

■ Émetteur laser modulé en fréquence

Le microlaser modulé est un microlaser actif à émission continue ; il est composé de deux cavités couplées constituant la cavité Pérot Fabry du laser ([figure 7](#)) :

Figure 7 - Microlaser YAG modulé en fréquence



- la première cavité est formée par le matériau laser (ou matériau à gain) ;
- la seconde constituée d'un matériau électro-optique va avoir une longueur variable en fonction de la tension appliquée à ses bornes.

Ø Tableau **1** - Caractéristiques des lasers puce

La **cavité Pérot Fabry** ou **Fabry Pérot** est un oscillateur ou résonateur optique. Pour le laser puce, elle est constituée du miroir d'entrée et du miroir de sortie ([figure 4](#)) en regard l'un de l'autre. Ces deux miroirs sont plans et parallèles. Ils sont partiellement réfléchissants $r > 95 \%$ mais aussi partiellement transparents $t < 5 \%$ occasionnant des pertes.

On considère cette cavité comme un oscillateur car les photons envoyés à l'intérieur par le miroir d'entrée vont effectuer des allers et retours entre les deux miroirs. À cause des pertes une partie des photons sortiront à chaque passage sur les miroirs. Ces pertes vont produire le faisceau laser.

Ø Figure **6** - Synoptique d'une détection cohérente

Ø Figure **7** - Microlaser YAG modulé en fréquence

En réalité, sous l'action du champ électrique, on va modifier l'indice de réfraction du matériau électro-optique par l'effet Pockel et, par le fait du couplage, modifier la longueur de la cavité Pérot Fabry du laser.

Dans le cas d'une **détection cohérente**, il est important d'avoir un émetteur laser monomode longitudinal

transverse avec une grande pureté spectrale.

■ **Circuit de réception**

Le circuit de réception est de bande passante plus faible que dans la technique *temps de vol* et il est possible d'utiliser un filtrage pour supprimer les fréquences parasites qui ne sont pas comprises dans la zone de mesure.

■ **Traitement du signal**

Le traitement du signal est lui aussi très différent de celui de la technique du temps de vol.

Dans le cas du temps de vol, il s'agit de mesurer une durée temporelle alors que, pour la technique FMCW, il faut mesurer des fréquences, ce qui paraît, en première approximation, moins compliqué.

La **solution la plus simple**, pour déterminer les fréquences f_{b1} et f_{b2} , est l'utilisation d'un compteur qui déterminera le nombre de périodes de la pseudo-horloge constituée par les franges d'interférences issues du circuit de réception durant la durée de la rampe de modulation montante puis descendante (formules (5), (6) et (7)). Cette solution n'est valable que dans les cas où les signaux reçus ont une amplitude importante, très largement au dessus du bruit et avec suffisamment de périodes significatives pour que le comptage soit suffisamment précis.

Compte tenu de ces inconvénients il est préférable de digitaliser les signaux et d'effectuer une **transformée de Fourier** qui donnera de meilleurs résultats.

Caractéristiques

Les caractéristiques actuelles des différents laser puce sont données dans le [tableau 1](#).