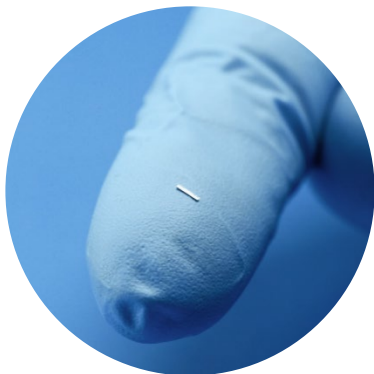


Sources laser pour les applications de détection acoustique distribuée

La détection acoustique distribuée (DAS) repose sur la diffusion de la lumière dans les fibres optiques pour détecter les perturbations de la fibre elle-même sur toute sa longueur. Étant donné la faiblesse du signal de diffusion, des efforts se poursuivent afin d'améliorer la sensibilité de la DAS, ainsi que sa résolution spatiale et sa portée maximale. À cette fin, des méthodes de détection cohérente sont couramment utilisées. Ces méthodes sont très exigeantes en ce qui concerne la longueur de cohérence et la stabilité de la source laser. Des sources laser stables, à spectre étroit et à faible bruit de fréquence sont donc nécessaires pour améliorer la sensibilité du DAS tout en permettant une détection sur de longues distances.

Le DAS s'est révélé utile dans divers domaines, notamment la surveillance de périmètre contre les intrusions, la surveillance des infrastructures et la sismologie. Son immunité aux interférences électromagnétiques et sa compatibilité avec les réseaux de fibres optiques existants en font une technologie promise à une adoption plus large. Il est donc crucial de développer des sources lumineuses compactes, économiques et hautement stables. Dans cette optique, nous présentons ici le potentiel du module laser à faible largeur de raie LXM d'indie en tant que candidat pour les systèmes DAS cohérents.



Principes de la détection acoustique distribuée

Lorsqu'elle traverse une fibre optique, la lumière rencontre des défauts tels que des points de contrainte ou des inhomogénéités dans le verre et subit une diffusion de Rayleigh. Bien que la majeure partie de la lumière diffusée sorte immédiatement de la fibre, une petite partie est recapturée et se dirige vers un détecteur qui est généralement installé à l'entrée de la fibre. Il est alors possible de détecter ce signal de diffusion de Rayleigh (figure 1).

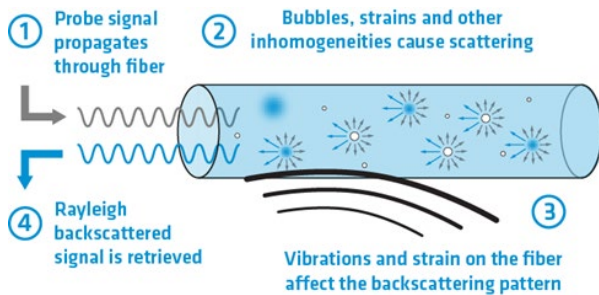


Figure 1. Aperçu des principes du DAS.

La forme d'onde du signal de Rayleigh est liée à la distribution des défauts le long de la fibre. Ainsi, le signal de Rayleigh d'une fibre non perturbée est unique et reproductible. Cependant, toute perturbation de la fibre, telle que des signaux acoustiques, peut avoir un impact sur le signal de Rayleigh. Ce sont ces écarts qui sont détectés et interprétés par le DAS. En faisant correspondre soigneusement la signature Rayleigh au temps de vol sur la longueur de la fibre, il est possible d'attribuer une position à chaque perturbation.

Les techniques DAS peuvent être divisées en deux grandes catégories, bien que plusieurs avancées récentes reposent sur une combinaison de ces techniques [1-3]. La première catégorie est la réflectométrie optique dans le domaine temporel (OTDR). Une impulsion est lancée dans la fibre et le signal de Rayleigh qui en résulte est détecté en continu à l'entrée de la fibre. La résolution spatiale de ce système est inversement proportionnelle à la durée de l'impulsion. Comme les impulsions sont courtes (typiquement des dizaines à des centaines de nanosecondes) et que la puissance de crête de

l'impulsion doit être limitée pour éviter des effets non linéaires indésirables dans la fibre, le signal de Rayleigh obtenu pour toute position donnée dans la fibre est assez faible. C'est pourquoi les techniques OTDR bénéficient de schémas de détection cohérents pour accroître leur sensibilité [2].

La deuxième catégorie est la réflectométrie optique dans le domaine de la fréquence (OFDR). Dans ce cas, la lumière n'est pas pulsée mais balayée en fréquence. Le signal de Rayleigh est mélangé de manière cohérente avec une référence locale et la note de battement qui en résulte est détectée. La fréquence de la note de battement étant proportionnelle à la position d'origine du signal de diffusion de Rayleigh, il est possible de récupérer des informations spatiales. L'un des principaux avantages de l'OFDR est que l'énergie totale lancée dans la fibre est beaucoup plus importante. En effet, comme la source laser est continue plutôt que pulsée, un rapport signal/bruit plus élevé peut être atteint tout en évitant les problèmes de puissance de crête.

Dans les deux cas, les méthodes de détection cohérente exigent que le signal reste cohérent avec l'oscillateur local après sa propagation sur la longueur de la fibre et en sens inverse. Cela limite la portée maximale de détection, qui doit être inférieure à la moitié de la longueur cohérente de la source laser. La grande longueur de cohérence offerte par les lasers à spectre étroit permet donc des applications DAS à longue portée.

En outre, la détection des perturbations repose sur des mesures comparatives entre le signal de diffusion de Rayleigh en temps réel et un signal de référence acquis précédemment. Toute dérive lente de la fréquence peut affecter le modèle de diffusion de Rayleigh non perturbé et rendre la comparaison peu fiable, ce qui entraîne une perte du rapport signal/bruit et une moindre sensibilité du système DAS. La source laser doit donc répondre à une exigence supplémentaire : son bruit de fréquence doit être minimal aux basses fréquences de Fourier.

Pour ces raisons, les sources laser qui offrent un faible bruit de fréquence et une grande longueur de cohérence, telles que les lasers à spectre étroit, sont essentielles pour les applications DAS.

Les solutions d'indie pour le DAS

L'expertise d'indie en matière de conception de diodes laser à rétroaction distribuée (DFB) et d'électronique de contrôle éliminant le bruit de fréquence est mise à profit dans le LXM-U, un module laser abordable à haute performance. Le LXM-U est le seul laser qui combine le bruit à basse fréquence traditionnellement associé aux lasers à fibre (figure 2) avec le bruit à faible intensité inhérent aux lasers à semi-conducteur (SCL) (figure 3). En fait, le LXM-U présente un bruit de fréquence nettement plus faible que les lasers à fibre (jusqu'à deux ordres de grandeur) dans la région d'intérêt des basses fréquences (la fenêtre d'acquisition des fréquences DAS, qui s'étend typiquement jusqu'à 50 kHz, est ombrée en gris dans la figure 2).

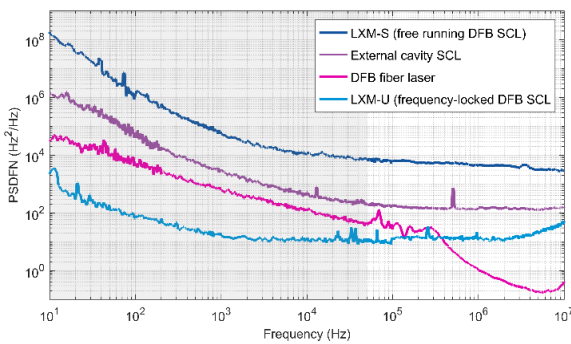


Figure 2. Densité spectrale de puissance du bruit de fréquence (PSDFN) du module LXM fonctionnant librement (LXM-S), d'un laser à semi-conducteur à cavité externe, d'un laser à fibre à rétroaction distribuée et d'un LXM-U verrouillé en fréquence.

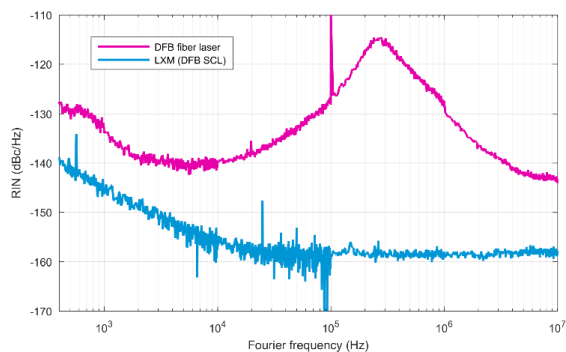


Figure 3. Bruit d'intensité relatif (RIN) du laser LXM à semi-conducteur à rétroaction distribuée (DFB) par rapport à un laser à fibre DFB

Contrairement aux lasers à cavité externe, la stabilité du mode optique du LXM-U ne dépend pas d'un alignement critique entre le milieu de gain et un résonateur. La stabilité éprouvée des diodes laser DFB est donc conservée et la réduction du bruit de fréquence ne se fait pas au détriment de la stabilité du laser. La petite taille de la diode offre également un avantage par rapport aux lasers à fibre, dont les cavités plus longues sont réputées pour leur sensibilité aux perturbations mécaniques (figure 4).

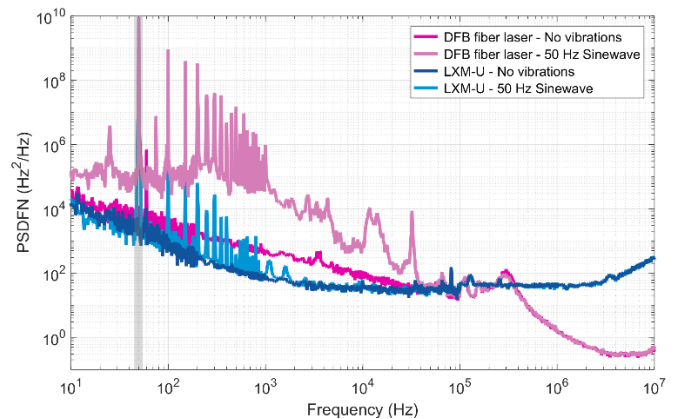


Figure 4. Comparaison entre la PSDFN d'un laser à fibre DFB et celui du LXM-U lorsque chaque système est soumis à une vibration de 50 Hz. La zone grisée correspond à l'onde acoustique sinusoïdale de 50 Hz appliquée aux lasers. Le LXM-U conserve un profil de PSDFN plus bas sous vibration que le laser à fibre dans les mêmes conditions ; le LXM-U n'est affecté que par la tonalité acoustique et les harmoniques alors que le laser à fibre est affecté sur l'ensemble du spectre jusqu'à 30 kHz.

Grâce à sa robustesse, à sa stabilité mécanique et à une largeur de raie instantanée typiquement inférieure à

0,08 kHz*, le LXM-U convient parfaitement aux applications DAS cohérentes à haute sensibilité et à longue portée. Le LXM-S est également disponible. Il s'agit d'une version à pilotage direct de la diode laser DFB, idéale pour les applications DAS à faible portée.

Pour les applications OFDR, de meilleures résolutions spatiales sont obtenues avec des balayages de fréquence de plus grande amplitude. Le LXM-S offre des balayages de fréquence allant jusqu'à 8 GHz†, ce qui le rend bien adapté aux applications OFDR à faible portée et à haute résolution. Par ailleurs, la capacité de balayage de fréquence de 200 MHz du LXM-U est compatible avec les architectures OFDR à longue portée, une approche qui est prometteuse pour des applications telles que la surveillance des câbles sous-marins, par exemple [4]. En résumé, les solutions LXM offrent une grande souplesse en termes de taux de balayage et d'amplitude de modulation, ce qui permet de les adapter à une large gamme d'applications.

En OFDR, un autre paramètre important est la linéarité du balayage en fréquence, de sorte que la fréquence du battement entre la référence locale et le signal réfléchi reste strictement proportionnelle au temps d'aller-retour de ce dernier. Tout écart par rapport à cette relation linéaire entraîne une perte de sensibilité et de précision de la distance [5]. La réponse ultraplate à la modulation de fréquence des modules LXM permet d'atteindre des linéarités élevées dans une variété de modes de modulation. Par exemple, nous avons démontré un balayage de 8 GHz d'excursion à un taux de modulation de 10 kHz et une non-linéarité résiduelle inférieure à 0,01 % avec un LXM-S (figure 5), ce qui permet de développer des architectures DAS OFDR avec une résolution spatiale en dessous du mètre.

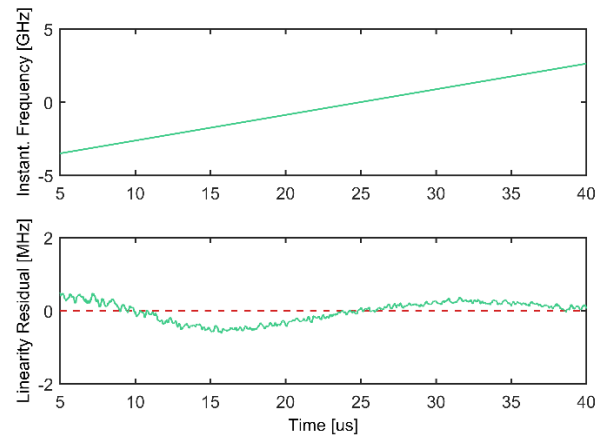


Figure 5. LXM-S modulé avec des balayages de fréquence de 8 GHz d'amplitude. En haut : fréquence optique instantanée du balayage. En bas : Non-linéarité résiduelle du balayage.

La figure 6 présente une expérience de DAS dans le domaine fréquentiel réalisée dans le laboratoire d'indie avec un équipement dédié à la recherche sur le lidar à ondes continues modulées en fréquence (LiDAR FMCW) [6]. Cette démonstration a été réalisée avec un balayage très linéaires de 1 GHz d'amplitude à un taux de répétition de 100 kHz.

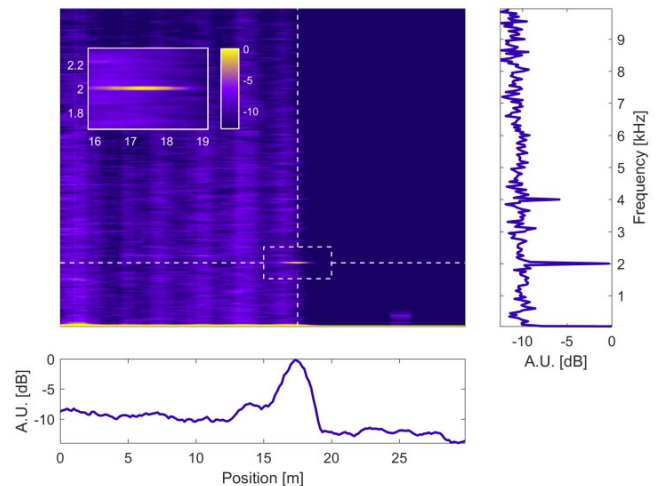


Figure 6. Expérience DAS simple avec la source DFB SCL d'indie. Une tonalité de 2 kHz appliquée à 17 m du point d'injection sur une fibre SMF-28 est détectée par un système OFDR.

* Largeur de raie instantanée calculée en multipliant la valeur de la PSDFN à 1 MHz par π .

† La configuration standard offre une excursion en fréquence typique de 4 GHz, mais il est possible d'étendre cette excursion au besoin.

Conclusion

Les modules lasers à spectre étroit permettent de réaliser des systèmes DAS cohérents et performants avec une sensibilité accrue et des portées spatiales plus longues. Afin d'accompagner l'évolution des technologies DAS, le LXM est un module laser compact, robuste et stable, spécialement conçu pour une utilisation industrielle. Par rapport aux lasers à fibre, le LXM-U verrouillé en fréquence offre une PSDFN inférieure aux basses fréquences de Fourier, région où les systèmes DAS sont particulièrement sensibles au bruit de fréquence. En outre, ses performances sont moins affectées par les perturbations mécaniques. Pour des applications telles que la réflectométrie optique dans le domaine des fréquences, les solutions LXM offrent également des balayages de fréquence fortement linéaires. Ces lasers offrent une flexibilité élevée en matière de taux de balayage et d'amplitudes de modulation, leur permettant ainsi de s'adapter à divers cas d'utilisation. La mise à disposition de lasers stables à spectre ultra étroit joue un rôle clé dans le développement des technologies DAS de prochaine génération et ne doit pas être sous-estimée.

[1] Muanenda Y., Recent Advances in Distributed Acoustic Sensing Based on Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry. *J. Sens.*, 2018, vol. 2018, pp. 1-16

[2] Rao Y, Wang Z, Wu H, Ran Z and Han B., Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ -OTDR). *Photonic Sens.*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 1-30

[3] Ding Z, *et al.*, Distributed Optical Fiber Sensors Based on Optical Frequency Domain Reflectometry: A review. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 4, p. 1072

[4] Mazur M, *et al.*, Advanced Distributed Submarine Cable Monitoring and Environmental Sensing using Constant Power Probe Signals and Coherent Detection. arXiv:2303.06528v1 [eess.SP]

[5] Liang C, Bai Q, Yan M, Wang Y, Zhang H, and Jin B., A Comprehensive Study of Optical Frequency Domain Reflectometry., *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 41647–41668

[6] Cardin V, *et al.*, Narrow-linewidth semiconductor laser with highly-linear frequency modulation response for coherent sensing. *Proc. SPIE 12905, Novel In-Plane Semiconductor Lasers XXIII, 129050F (2024)*