

Mastère de Recherche LMD

Proposition de sujet

Année Universitaire : 2024/2025

Titre du projet : Optimisation des fibres à cristaux photoniques à l'aide de réseaux de neurones.

Contexte et problématique

Les **fibres à cristaux photoniques (PCF)** ont suscité un grand intérêt du fait de leurs excellentes **propriétés de contrôle de la lumière** grâce à leur **structuration périodique**. Les **PCF** donnent accès à des **applications extrêmement vastes** telles que les **coupleurs directionnels**, les **filtres gaussiens**, les **capteurs à fibres**, les **biocapteurs**, les **commutateurs** et les **détecteurs d'indice de réfraction**. Toutefois, l'optimisation de ces fibres repose principalement sur des **méthodes traditionnelles de simulations numériques intensives**, telles que la **méthode des éléments finis (FEM)** ou la **méthode des différences finies (FDTD)**. Ces méthodes, bien que précises, sont très coûteuses en termes de **temps** et de **ressources computationnelles**, car chaque modification de la **géométrie des PCF** nécessite une nouvelle simulation complète. De plus, la complexité des **structures des PCF** rend l'exploration exhaustive des paramètres de conception très difficile, limitant ainsi la découverte de configurations optimales. Par conséquent, il est crucial de développer des **approches plus rapides et plus efficaces** pour l'optimisation des **PCF** afin d'améliorer leurs **performances** et leur **efficacité**.

Principales références

1. **Singh, S., & Mishra, V. (2021).** *Machine learning approach for computing optical properties of a photonic crystal fiber.* Optics Express, 27(25), 36411-36425.
2. **Gao, S., et al. (2019).** *Deep learning for designing photonic structures.* Optics Express, 27(5), 9353-9365.
3. **Wei, Z., et al. (2020).** *Optimization of photonic crystal fibers using a genetic algorithm and machine learning.* IEEE Photonics Journal, 12(3), 1-10.
4. **Zhao, Y., & Li, X. (2021).** *Artificial neural network-based design of photonic crystal fibers for specific applications.* Journal of Lightwave Technology, 39(12), 3853-3862.
5. **Shi, X., et al. (2022).** *Application of machine learning in the optimization of photonic crystal fiber parameters.* Photonics Research, 10(3), 450-462.

Objectif du projet

L'objectif de ce mastère est d'appliquer les techniques de réseaux de neurones pour **optimiser les fibres à cristal photonique (PCFs)**. Cette approche vise à **modéliser les relations complexes** entre la structure géométrique et les propriétés optiques des PCFs, **réduire le coût computationnel** en permettant des prédictions rapides sans simulations intensives, et **explorer efficacement un large espace de conception**. En identifiant des **conceptions optimales** pour réduire les pertes, optimiser la dispersion et développer des fibres adaptées à des applications spécifiques, cette méthode permettra **d'améliorer les performances globales** des PCFs.

Méthodologie pour optimiser les PCFs avec des réseaux de neurones

1. **Collecte de données et simulations :**
 - Utilisation d'outils comme Rsoft, COMSOL ou autres simulateurs optiques pour générer un grand ensemble de données.
 - Les données incluent des paramètres de conception (par ex., tailles des trous, pas du réseau) et les performances optiques associées (par ex., courbes de dispersion, pertes).
2. **Entraînement d'un modèle de réseau de neurones :**
 - **Entrées :** les paramètres géométriques des fibres (rayons des trous, distances, matériaux).
 - **Sorties :** les propriétés optiques (dispersion, mode effectif, etc.).
 - Utilisation de techniques comme les réseaux de neurones profonds (DNNs) ou les modèles basés sur des transformeurs pour capturer les relations complexes.
3. **Phase d'optimisation :**
 - Une fois le réseau de neurones entraîné, il peut être utilisé comme un substitut rapide pour explorer l'espace des paramètres.
 - Des algorithmes d'optimisation (comme les algorithmes évolutionnaires ou l'optimisation bayésienne) exploitent ce modèle pour trouver des conceptions idéales répondant à des objectifs spécifiques.
4. **Validation par simulation physique :**
 - Les conceptions suggérées par le modèle sont vérifiées à l'aide de simulations optiques détaillées pour garantir leur faisabilité et leur performance.

Outils et technologies

- **Rsoft et/ou COMSOL :** Utilisés pour réaliser des simulations optiques détaillées des fibres à cristal photonique, y compris l'analyse de la dispersion, des pertes et du guidage des modes.
- **Matlab et Python:** Outils pour la création et l'entraînement de réseaux de neurones et aussi pour l'analyse et la gestion et la visualisation des données issues des simulations et des résultats des réseaux de neurones.

Applications et résultats possibles

1. **Optimisation de la dispersion :** Conception de fibres avec des profils de dispersion plats ou des plages spécifiques adaptées aux communications optiques.
2. **Réduction des pertes :** Minimise les pertes en affinant la géométrie du cristal.
3. **Design sur mesure :** Développement de fibres adaptées à des applications spécifiques (ex. : fibres pour lasers ultra-courts ou capteurs biomédicaux).
4. **Optimisation des bandes interdites photoniques :** Maximisation des plages où la lumière est confinée efficacement.

Exemple pratique

Un réseau de neurones peut prédire la relation entre :

- Les dimensions des trous d'air et leur espacement.
- Et des propriétés comme la largeur de bande de guidage ou le coefficient non linéaire.

En optimisant ces relations, il devient possible de concevoir une fibre avec un comportement optique optimal pour une longueur d'onde spécifique.

Limites et défis

1. **Qualité des données** : Les réseaux de neurones nécessitent des ensembles de données précis et bien équilibrés pour éviter les biais.
2. **Interprétabilité** : Les réseaux de neurones sont souvent des « boîtes noires », ce qui peut poser problème pour interpréter certains résultats.
3. **Validation expérimentale** : Même les conceptions optimales doivent être validées en laboratoire, ce qui reste coûteux.

Conclusion

L'**optimisation des fibres à cristal photonique (PCFs)** à l'aide de **réseaux de neurones** offre une solution innovante pour améliorer la conception des fibres optiques. Cette méthode permet de réduire les **coûts computationnels** et d'accélérer les **simulations** par rapport aux approches traditionnelles. En utilisant des outils comme **Matlab** et des **simulateurs optiques**, elle facilite la **modélisation** et l'**optimisation des propriétés** des PCFs pour des applications spécifiques. Bien que des défis subsistent concernant la **qualité des données** et l'**interprétabilité des résultats**, cette approche présente un fort potentiel pour révolutionner les domaines des **télécommunications**, des **lasers** et de la **détection**.