

Mastère de Recherche LMD

Proposition de sujet

Année Universitaire : 2024/2025

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

Contexte et problématique

Les **fibres à cristaux photoniques coniques** (*Tapered Photonic Crystal Fibers, TPCFs*) ont une **géométrie variable**, où les dimensions transversales ou la structure du réseau changent le long de la longueur de la fibre, offrant ainsi des **propriétés optiques uniques**. Cette caractéristique permet de contrôler précisément les **propriétés de guidage** et de **dispersion** de la lumière, ce qui les rend particulièrement adaptées à des applications telles que la **conversion de modes**, la **génération de supercontinuum** pour les lasers à impulsions ultracourtes, l'**amélioration du guidage non linéaire** pour des systèmes d'imagerie avancés, ainsi que des **capteurs optiques** ultra-sensibles. L'**optimisation** des TPCFs repose sur l'ajustement de paramètres géométriques complexes, tels que le **profil conique** et l'**espacement des trous**, pour maximiser leurs performances. Face aux limites des approches classiques d'**optimisation paramétrique**, l'utilisation de **techniques avancées** permet de rendre ce processus plus rapide et plus efficace.

Principales références

1. **Zhao, Y., et al. (2019).** *Artificial neural networks for the design of photonic crystal fiber tapers.* Journal of Lightwave Technology, 37(15), 3876-3882.
2. **Liu, X., & Sun, Y. (2020).** *Neural network-based optimization of photonic crystal fiber tapers for dispersion management.* Photonics Research, 8(9), 1331-1340.
3. **Chen, H., et al. (2021).** *Optimizing the tapering process of photonic crystal fibers using deep learning techniques.* IEEE Photonics Journal, 13(2), 450-459.
4. **Zhang, Y., et al. (2022).** *Deep learning for the design and optimization of tapered photonic crystal fibers.* Applied Optics, 61(3), 827-835.
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 travail est d'**optimiser les fibres à cristaux photoniques coniques (TPCFs)** en utilisant des **techniques avancées** telles que les **réseaux de neurones** et les **algorithmes évolutionnaires**. Cette optimisation vise à ajuster les paramètres géométriques complexes des fibres, comme le **profil conique** et l'**espacement des trous**, afin de maximiser leurs **performances optiques**, notamment en termes de **guidage de la lumière**, de **dispersion**, de **pertes de transmission** et de **non-linéarité**. Le but est de permettre la conception de TPCFs adaptées à des applications spécifiques, tout en réduisant le temps de calcul nécessaire par rapport aux méthodes d'optimisation classiques.

Méthodologie pour optimiser pour optimiser une TPCF

1. **Définir l'objectif :**
 - Identifier les propriétés optiques cibles, telles que la dispersion, les pertes de confinement, la non-linéarité, ou la génération de supercontinuum.
 - Déterminer les critères de performance à optimiser, par exemple, la minimisation des pertes ou la maximisation de l'efficacité non linéaire.
 - Exemple : Obtenir une dispersion plate entre 1,2 μm et 1,8 μm pour une application de supercontinuum.
2. **Modéliser la fibre :**
 - Utiliser des logiciels de simulation optique comme RSoft ou COMSOL pour la modélisation de la fibre conique avec des géométries paramétriques.
 - Définir les paramètres géométriques tels que le profil conique, la taille des trous d'air, l'espacement entre les trous et la longueur de la fibre.
3. **Collecte de données et simulation initiale :**
 - Effectuer des simulations optiques pour obtenir un large jeu de données associant les paramètres géométriques aux propriétés optiques.
4. **Entraînement du modèle de réseau de neurones :**
 - Former un modèle basé sur un réseau de neurones sur un ensemble de données simulées.
 - Utiliser ce modèle comme un substitut pour prédire les propriétés optiques rapidement.
5. **Créer un algorithme d'optimisation :**
 - Représenter chaque configuration de fibre par un vecteur de paramètres.
 - Utiliser des algorithmes d'optimisation (comme les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaim particulaire (PSO) ou l'optimisation bayésienne) pour explorer l'espace de conception.
6. **Valider et affiner :**
 - Vérifier les meilleures solutions obtenues par des simulations détaillées et valider expérimentalement si possible.
 - Affiner les solutions obtenues en ajustant les paramètres d'optimisation ou en utilisant des modèles plus détaillés pour les simulations.

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

L'optimisation des fibres à cristal photonique coniques TPCFs se concentre sur deux aspects principaux :

1. **Profil conique :**
 - La variation longitudinale des paramètres géométriques (taille des trous d'air, espacement, le profil conique, la longueur totale de la fibre, etc.).
 - L'ajustement du taux de conicité pour atteindre des propriétés spécifiques.

2. Propriétés optiques ciblées :

- Minimiser la perte de confinement dans une plage de longueurs d'onde donnée.
- Optimiser la dispersion pour des applications ultra-rapides.
- Maximiser les effets non linéaires pour les générateurs de supercontinuum.

Exemple pratique

Génération de supercontinuum avec une dispersion plate dans une fibre conique.

- **Optimisation paramétrique :** Un AG est utilisé pour ajuster la variation longitudinale du diamètre des trous d'air et la matrice de la fibre.
- **Résultat :** Une fibre conique présentant une dispersion plate, une efficacité non linéaire accrue et une plage spectrale élargie.

Défis et solutions

1. Complexité computationnelle :

- Les simulations de profils coniques 3D sont coûteuses.
- **Solution :** Utiliser des modèles simplifiés pour des évaluations rapides, puis affiner avec des simulations détaillées.

2. Convergence vers un optimum local :

- Les algorithmes peuvent se bloquer sur des solutions sous-optimales.
- **Solution :** Introduire une diversité élevée dans la population initiale et appliquer des mutations plus fréquentes.

3. Fabrication expérimentale :

- Les solutions optimales obtenues doivent être réalisables.
- **Solution :** Ajouter des contraintes de fabrication dans la phase d'optimisation.

Conclusion

L'optimisation des fibres à cristaux photoniques coniques (TPCFs) basées sur l'**intelligence artificielle** représente une avancée majeure en photonique. Grâce à des techniques avancées telles que les **algorithmes génétiques**, l'**optimisation par essaim particulaire (PSO)** et les **réseaux de neurones**, il est possible d'explorer et de concevoir des fibres aux performances optiques optimales avec une efficacité accrue. Les TPCFs bénéficient d'une géométrie variable permettant d'ajuster finement leurs propriétés optiques, rendant ces fibres idéales pour des applications exigeantes comme la **génération de supercontinuum**, la **conversion de modes** et la **détection sensible**.