



Sakurai-Sugiura法を用いた光ファイバの分散特性の 高速高精度解析に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2021-06-23 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 對馬, 康雄 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00010385

氏 名 對馬 康雄

学位論文題目 Sakurai-Sugiura 法を用いた光ファイバの分散特性の高速高精度解析
に関する研究

論文審査委員 主査 教授 長谷川 弘治
教授 辻 寧英
教授 渡邊 浩太

論文内容の要旨

光ファイバの断面構造設計には、自動最適化技術が不可欠である。構造最適化は、目的関数を最小化する構造変数の組み合わせを自動で探索することで実施する。構造探索時に目的関数を多数回計算するため、目的関数の算出に用いる分散特性の計算が高速でなければ、実用的な時間で最適化することが困難となる。例えば、群速度ならびに群速度分散であれば、電磁界解析により得られた伝搬定数を波長に関して 1 階微分、2 階微分することで求まる。

伝搬定数算出には、有限差分法や有限要素法に基づく市販の電磁界シミュレータが利用できる。通常は、百万程度の自由度を有する一般化固有値問題に帰着させる有限要素解析 (FEA) を行う。この求めた伝搬定数の微分値は、数値微分である差分法、固有値問題から導いた超越方程式を陰関数定理に基づき微分する方法で算出する。差分法は、複数の波長における位相速度値から多項式補間により微分値を計算するものであり、容易に計算できる。しかしながら、適切な差分間隔が、求める微分値よりも高次の微分値から定まるため、多数の位相速度計算値を用いて差分間隔を決定する必要がある。他方、陰関数定理に基づく方法では、行列式の微分を用いると計算時間が長くなり、左固有ベクトルを用いて超越方程式を導出すると 2 階微分に固有ベクトルの微分が必要となる。このように伝搬定数の微分値計算には、未だ課題が残されていた。

一方、Trefftz 法を電磁界解析に適用した Multipole Method (MM) は、波動関数を補間関数とするため高精度の位相速度値が求まることが期待でき、同程度の精度の FEA と比較すると、固有値問題の係数行列の次元が小さくなるため、Sakurai-Sugiura 法 (SSM) により高速に計算可能である。しかしながら、波動関数展開の展開次数を大きくすると電磁界解析精度が低下する問題があった。また SSM に起因するスプリアス解を含んだ位相定数が求まるので、スプリアス解を判別除去する必要がある。さらに MM では、円柱ならびに楕円柱を含む断面構造しか扱えなかった。

本論文は、光ファイバの自動最適化設計を目的として、SSM を用いた光ファイバの高速高精度な分散特性解析法について取り纏めたものである。まず伝搬定数の微分値計算法として、SSM により得た 4 行 4 列以下の一般化固有値問題から 4 次以下の代数方程式を導き、

固有値を周波数に関する陽関数として表現し、自動微分を適用することで微分値を得る方法を開発した。またMMの問題点を解消するために、定式化を変更し、波動関数展開の展開次数の増加に伴う精度低下の軽減に成功した。さらにSSMの解に含まれるスプリアス解は、低計算コストである固有値の条件数により、判別除去できることを示した。従来のTrefftz法に課されていた形状の制約を取り除くため、ハイブリッドトレフツ有限要素法にSSMを適用する伝搬特性解析法を開発した。これらの妥当性と有用性は、円や楕円空孔、環状型空孔を有するホーリーファイバの数値解析例により示した。

ABSTRACT

For optimizing profiles of optical fibers by solving an optimization problem with an objective function including propagation constants, group velocities, or group velocity dispersions, fast and precise numerical methods are required for computing these propagation characteristics. Trefftz methods including the transfer matrix method and the multipole method for computing propagation constants are attractive for designing simple profile of optical fibers due to the advantage of being inherent mesh-free nature and easy imposing the radiation-condition on the guided electromagnetic fields without artificial medium surrounding the cladding over the finite-element method and finite-difference time-domain method. However, four improvements of the Trefftz method were required: (1) there is no fast and precise scheme for computing the differential coefficients of degenerate and nondegenerate propagation constants computed by the Trefftz methods, (2) upper and lower limits of the Fourier-Bessel expansions for the wavefunctions employed in the Trefftz methods may be small for accurately approximating the fields in the complex profile, (3) the Trefftz methods employ the wave-functions for approximating electromagnetic wave fields cannot apply to complex profiles with inhomogeneous media, and (4) because the Sakurai-Sugiura method (SSM) inherently includes spurious solutions of the nonlinear eigenvalue-problem, the low cost criteria in computation for sorting the eigenvalues from results by the SS method was not known. This thesis presented solutions for overcoming above problems of Trefftz method analysis with the SSM solver as follows: (1) a fast and precise scheme to compute the differential coefficients of propagation constants for computing group velocities and group velocity dispersions by making up the explicit forms of eigenvalues from a generalized eigenvalue problem converted from a nonlinear eigenvalue problem given by the Trefftz methods employing the SSM, (2) a refined formulation of the multipole method for relaxing the upper and lower limitations of the number of Fourier-Bessel expansions of electromagnetic fields in optical fibers, (3) a solution based on the hybrid Trefftz finite element method employing the SSM as a nonlinear eigenvalue solver for analyzing complex profiles of photonic optical fibers, and (4) a criterion for selecting the spurious solutions from the eigenvalues computed by the SSM. Numerical results of step-index and holey fibers with circular, elliptic, and ring-shaped cylinders showed that developed

solutions remove the problems of the Trefftz methods.

論文審査結果の要旨

光ファイバ断面構造の設計には、位相速度、群速度ならびに群速度分散が必要となる。これらは、電磁界解析により得られた伝搬定数とこれを波数に関して1階微分、2階微分した値から計算できる。伝搬定数は、有限差分法や有限要素法に基づく市販の電磁界シミュレータで容易に計算できる。通常は、百万程度の自由度を有する一般化固有値問題に帰着させる有限要素解析 (FEA) を行う。伝搬定数の微分値は、数値微分である差分法、固有値問題から導いた超越方程式を陰関数定理に基づき微分する方法で算出する。差分法では、複数の波長における位相速度値から多項式補間により微分値を計算するが、適切な差分間隔が、求める微分値よりも高次の微分値から定まるため、多数の位相速度計算値を用いて差分間隔を決定する必要がある。他方、陰関数定理に基づく方法では、行列式の微分を用いると計算時間が長くなり、左固有ベクトルを用いて超越方程式を導出すると2階微分に固有ベクトルの1階微分が必要となる。このように伝搬定数の微分値計算には、未だ課題が残されていた。

一方、Trefftz法を電磁界解析に適用したMultipole Method (MM) は、波動関数を補間関数とするため高精度の位相速度値が求まることが期待でき、同程度の精度のFEAと比較すると、固有値問題の係数行列の次元が小さくなるため、Sakurai-Sugiura法 (SSM) により高速に計算可能である。しかしながら、波動関数展開の展開次数を大きくすると電磁界解析精度が低下する問題があった。またSSMに起因するスプリアス解を含んだ位相定数が求まるので、スプリアス解を判別除去する必要がある。さらにMMでは、円柱ならびに楕円柱を含む断面構造しか扱えなかった。

提出された論文は、光ファイバの自動最適化設計を目的として、上記の課題を解決するための、SSMを用いた光ファイバの高速高精度な分散特性解析法の研究成果を6章に取り纏めたものである。

第1章は序論である。

第2章では、伝搬定数の微分値の新規計算法として、SSMにより得た4行4列以下の一般化固有値問題から4次以下の代数方程式を導き、固有値を周波数に関する陽関数として表現し、自動微分を適用することで微分値を得る方法について述べている。

第3章では、MMの問題点を解消するための新定式化を示し、波動関数展開の展開次数の増加に伴う精度低下の軽減に成功したことを述べている。

第4章では、SSMの解に含まれるスプリアス解が、低計算コストである固有値の条件数により、判別除去できることを示している。

第5章では、従来のTrefftz法に課されていた形状の制約を取り除く方法として、ハイ

ブリッドトレフツ有限要素法にSSMを適用する伝搬特性解析法について述べている。

得られた研究成果並びに知見は、工学的価値があり、光導波路設計に有用で当該分野の発展に寄与することから、提出論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。