



電磁波導波路伝搬問題の高精度数値解析法に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2016-06-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 森田, 好人 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00008927

モリタ ヨシヒト

氏 名 森田 好人

学 位 論 文 題 目 電磁波導波路伝搬問題の高精度数値解析法に関する研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 長谷川 弘治

教 授 鏡 慎

教 授 辻 寧 英

論文内容の要旨

通信需要の増大に伴い、有線通信路の大容量化を目指した研究開発が盛んに行われている。光ファイバに代表される有線通信用の導波路の設計では、導波路断面構造（屈折率分布）を適切に構成することで、群遅延分散等の伝送特性を制御する。この断面構造の最適化は、候補とする断面構造ごとに伝送特性を評価し、良好な構造を選択することを繰り返すことで行われる。このため、設計の自動化には、候補とする構造の創出法が重要な技術となっており、最適化法の検討が盛んに行なわれている。また、数値計算を利用した伝送特性の定量的評価が多数回必要であることから、実用的な自動最適化法の開発には、伝送特性の数値計算法の高速化ならびに高精度化が要求されている。伝送特性計算法として、通常、汎用性が高く市販シミュレータでの利用が可能な多項式を補間関数とする有限要素法あるいは有限差分時間領域法が用いられる。どちらの解法も領域型であるため、外部にエネルギーを放射する漏洩モードの伝送特性を計算するためには、完全整合層を用いて閉領域化する必要がある。また、高精度なモード伝搬特性の解析には、数値分散のため、要素あるいは格子に解析領域を十分細分化する必要があるが、計算コストが大きくなる欠点がある。一方、高精度な伝送特性解析法として、波動関数による級数展開を利用するモード整合法等があるが、複雑な断面構造の解析は容易ではなく汎用性が犠牲となり、さらに最終的に解くべき問題が非線形固有値問題となる欠点がある。

本論文は、電磁波導波路の伝搬特性を高速かつ高精度に解析する数値解析法の開発に関する研究を取り纏めたものである。数値分散を有するが汎用性に優れた有限要素法と、数値分散が小さいが汎用性に劣る波動関数によるフーリエベッセル展開を併用可能なハイブリッドトレフツ有限要素解析法を新たに開発している。波動関

数を用いるため、非線形固有値問題（NEP）に帰着するが、Sakurai-Sugiura 射影法（SSM）を用いることで、指定した範囲内の全伝搬定数を縮退モードも含めて、高速に求解可能としている。なお、SSM を導波路解析の NEP に適用すると、モード数判定基準の設定が困難な場合があることが数値計算により明らかとなったため、新たな判定指標を見出して、この問題点を克服している。

具体的に、ホーリファイバならびに漏洩波アンテナを解析対象とした数値計算例によりその妥当性、有用性を示している。

ABSTRACT

With increasing requirement of information capacity of communication systems such as optical fiber networks, the many of fibers having larger information capacity, single polarization, lower dispersion, few modes, or wideband transmission properties have been developed. For finding innovative cross sections of fibers, optimal design schemes have been examined. Because optimization process expends a lot of time estimating the propagation characteristics of fibers, fast solutions to eigenmode analysis are desired and under investigation. In this thesis, a fast solver of eigenmode analysis was presented, and its validity and usefulness were demonstrated by numerical results of periodic waveguides and holey fibers. There are two contributions: first, a fast solver of simultaneous transcendental equations given by a nonlinear eigenvalue problem (NEP) was developed by finding criterions and using the Sakurai-Sugiura projection method (SSM). The SSM is a fast solver of NEP for computing all eigenvalues in an integration counter on a complex eigenvalue plane but spurious solutions originated in SSM appear when a value of the number of eigenvalues in the contour, N_e , is incorrectly estimated. The criterions of computed eigenvalues indicate the spurious solutions and avoids the requirement of correct N_e in the SSM. Using developed solvers, propagation characteristics of a holey fiber using the multi pole method and a leaky antenna with periodic metallic gratings using a hybrid Trefftz finite element method (HTFEM) were analyzed and its validity and usefulness were confirmed. Second, an accurate solver of eigenmode analysis was developed. This solver is based on the HTFEM with SSM and developed criterions as an NEP solver. Dividing cross

sections of fibers into elements with polynomial interpolation functions causes the numerical dispersion but yields flexibility of the cross sections in optimizing process. On the other hand, using Trefftz elements interpolating fields by superposition of the Fourier-Bessel expansion reduces the numerical dispersion and flexibility. Hence, using both of polynomial and Trefftz elements in suitable subregions of cross sections by hybrid variational principle, which is the hybrid finite element method, gives a fast solver of eigenmode analysis for the optimal design process. However, this approach yields an NEP as a substitute for generalized eigenvalue problems derived from using polynomial finite elements. In presented HTFEM, this disadvantage was overcome using the SSM and developed criterions as an NEP solver. Numerical results of hollow fibers show the usefulness and efficiency of the developed HTFEM solver and good agreement with the results of a conventional FEM with the perfect matched layer and a multi-pole method.

(409w)

論文審査結果の要旨

通信需要の増大に伴い、有線通信路の大容量化を目指した研究開発が盛んに行われている。光ファイバに代表される有線通信用の導波路の設計では、導波路断面構造（屈折率分布）を適切に構成することで、群遅延分散等の伝送特性を制御する。この断面構造の最適化は、候補とする断面構造ごとに伝送特性を評価し、良好な構造を選択することを繰り返すことで行われる。設計時には、このように、数値計算を利用した伝送特性の定量的評価が多数回必要であることから、実用的な自動最適化法の開発には、伝送特性の数値計算法の高速化ならびに高精度化が要求されている。

本論文は、導波路構造自動設計を目的として、電磁波導波路の伝搬特性を高速かつ高精度に解析する数値解析法の開発に関する研究を取り纏めたものである。数値分散を有するが汎用性に優れた有限要素法と、数値分散が小さいが汎用性に劣る波動関数によるフーリエ・ベッセル展開を併用可能なハイブリッド・トレフツ有限要素解析法（HTFEM）を新たに開発している。波動関数を用いるため、非線形固有値問題（NEP）に帰着するが、Sakurai-Sugiura 射影法（SSM）を用いることで、指定した範囲内の全伝搬定数を縮退モードも含めて、高速に求解可能としている。なお、SSM を導波路解析の NEP に適用すると、モード数判定基準の設定が困難な場合があ

ることが数値計算により明らかとなったため、新たな判定指標を見出して、この問題を克服している。具体的に、ホーリーファイバならびに漏洩波アンテナを解析対象とした数値計算例によりその妥当性、有用性を示している。

以下に本論文の構成の簡略に述べる。

第1章では、研究の背景、目的を述べている。

第2章では、本論文で新たに提案した HTFEM の定式化を述べるとともに、厳密な解法として知られるマルチポール法 (MM) によるホーリーファイバの定式化の概略を述べる。

第3章では、SSM を用いた NEP の求解について、漏洩波アンテナ、多層スラブ導波路、ホーリーファイバの伝搬特性解析を例として、通常用いられているゼロ点探索法 (滑降シンプレックス法) と計算時間の比較を行い、SSM の高速性を数値的に確認するとともに、混入するスプリアス解判別法についての検討結果を示している。

第4章では、光ファイバを対象として開発した HTFEM をホーリーファイバに適用し、市販有限要素シミュレータならびに MM による計算結果、計算時間の比較を行い、数値的に SSM と HTFEM を組合わせた解析法の精度ならびに時間の優位性を確認するとともに、HTFEM の妥当性、有用性を示している。

第5章では、本研究で得られた結果を総括している。

以上のように、本論文は数値解析に関わる新たな知見を提供するとともに、導波路開発の自動設計の高速化を通じて、工学的貢献が期待できることから、本学本専攻の審査基準に照らし審査に合格と判定する。