



モザイク型NRD導波路デバイスの最適設計

メタデータ	言語: English 出版者: 公開日: 2023-06-07 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: タヒル, バシル メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00010895

氏 名 TAHIR BASHIR (タヒル バシル)

学位論文題目 Optimal Design of Mosaic-like NRD Guide Devices
(モザイク型 NRD 導波路デバイスの最適設計)

論文審査委員 主査 教授 辻 寧英
教授 長谷川 弘治
教授 渡邊 浩太

論文内容の要旨

近年の通信システムの大容量化に伴い、ミリ波およびテラヘルツ波帯域の使用が積極的に検討されている。非放射型誘電体導波路(NRD ガイド)は、非放射型により低損失なため多くの注目を集めている。これまで提案されている NRD ガイドデバイスは、基本的な構造によるものが主である。さらに、NRD ガイドはその構造から 3 次元解析手法がしばしば使用され市販のソフトウェアでは計算コストが高くなる。この論文では、モザイク形状を用いた NRD ガイドの最適設計についていくつかの最適設計アプローチを提案する。計算コストを削減するために、効率の高いシミュレーション手法も開発した。

はじめに、直接二値探索法(DBS)を開発した。設計効率を向上させるため、数値シミュレーション手法として独自に開発した 2 次元フルベクトル有限要素法(2D-FVFEM)を採用している。有用性を示すために、NRD 市販の交差導波路と 90°曲り導波路の設計を行い、いずれも 99%を超える高い伝送効率が得られた。次に、バイナリベースの遺伝的アルゴリズム、差分進化アルゴリズム、ハーモニーサーチアルゴリズム、蛍アルゴリズム、粒子群最適化アルゴリズムを提案する。有用性を示すために、交差導波路、T 分岐導波路、曲り導波路、および周波数分離素子の設計を行った。それぞれの透過率は、交差導波路が 99.9%、T 分岐導波路が 49.9%:49.9%、曲り導波路では 96.4 %、周波数分離素子では 59 GHz で 96.4 %、61 GHz で 98.5 %が得られている。

次に、これまでに開発した 2D-FVFEM を、非相反性材料を含んだ NRD ガイドデバイスの設計に適応できるように拡張し、サーキュレータとアイソレータの設計をすることにより妥当性を確認した。所望の特性を達成するために、ハーモニーサーチと差分進化法を適用し、単一周波数での動作と広帯域化を実現した。

次に、NRD ガイドデバイスの解析のための厳密な 2 次元フルベクトル有限差分時間領域法(2DFDTD)を提案する。吸収境界条件として、畳み込み完全整合層(CPML)を用いた。さらに、LSM01 と LSE01 の各モードの透過率を推定するために厳密な定式化を確立した。NRD ガイド交差導波路、T 分岐導波路の解析を通してこの手法の有効性を示した。この研究では、いくつかの最適設計アプローチとシミュレーション手法を開発している。私達が提案する設計アプローチは、複雑なデバイス構造と機能を備えた多くの NRD ガイドデ

デバイスの設計にも適用できる。設計されたデバイスは小型で高性能なミリ波回路を実現するために十分な能力と可能性を持っている。

ABSTRACT

The use of millimeter- and terahertz-wave bands are being actively explored to increase communication system capacity and meet modern communication requirements. In recent years, non-radiative dielectric (NRD) waveguide device has received a lot of attention due to low loss nature. Several NRD guide components have been reported so far without employing any optimization approaches. On the other hands, those devices are simulated numerically using 3D simulation methods and commercially available softwares result in high computational time and simulation resources required. In this thesis, we propose several optimal design approaches based on mosaic optimization concept for the design of NRD guide. In order to reduce the computational cost, we also developed highly efficient simulation methods.

First, we develop direct binary search (DBS) algorithm. In order to improve design efficiency, we employ the originally developed two-dimensional full vectorial finite element method (2D-FVFEM) as a numerical simulation method. To show the usefulness, NRD crossing and 90⁰-bend waveguide are considered and high transmission efficiency greater than 99% is achieved at operating frequency 60 GHz. Then, we propose binary representation-based genetic algorithm, differential evolution algorithm, harmony search algorithm, firefly algorithm, and particle swarm optimization. To show the usefulness, four NRD circuit components are designed which include low crosstalk waveguide crossing, T-branch power splitter, bending waveguide, and frequency demultiplexer. The proposed optimal devices achieve high transmission efficiencies greater than 99.9%, 49.9%:49.9%, 99.9% at 60 GHz and 96.4%, 98.5% at 59 GHz and 61 GHz. In addition, the same NRD guide components except frequency demultiplexer are also designed at wideband operation and achieve broad bandwidth around 5 GHz, 4 GHz, and 3 GHz.

We extend our previously developed 2D-FV-FEM to be applicable for design of non-reciprocal NRD guide devices. The accuracy is confirmed by designing NRD circulator and isolator. To achieve the desired properties, harmony search and differential evolution algorithm are employed for single frequency and broadband operation respectively.

We propose rigorous two-dimensional full-vectorial finite difference time domain method for the analysis of NRD guide devices. Convolutional perfectly matched layer (CPML) is employed as an absorbing boundary condition. Furthermore, we have established a rigorous formulation for estimating the modal power of each LSM₀₁ and

LSE₀₁ mode. We confirmed the validity of the proposed method through the analysis of NRD crossing and T-branch guide devices. Excellent accuracy is achieved by the cross comparison of 2D-FV-FDTD results with 2D-FV-FEM.

In this research work, we develop several optimal design approaches and simulation methods. Our proposed design approaches are applicable to design a lot of NRD guide devices with complex device structures and functionalities as well. The designed devices have enough ability and potential to integrate in a circuit for the realization of complex, compact and high-performance millimeter-wave circuit.

論文審査結果の要旨

高速な無線ネットワークの構築のためミリ波・THz波の利用に関する研究が活発に行われている。ミリ波用の伝送路として様々なものが提案されているが、NRDガイドはその非放射性と低損失性から小型集積回路の実現への期待が高い。一方で、NRDガイドを伝送する非放射モードはハイブリッドモードであり、その解析・設計理論は十分に確立されていない。NRDガイドでは、より低損失なLSMモードを利用する際に、同時にLSEモードも伝送可能であるため、曲がりや不連続部でのモード結合を抑圧する必要があり、通常の単一モード伝送路に比べて設計をより難しくする。

こうした背景の下、本論文では、モザイク状構造NRDガイド素子を提案し、その効率的な数値解析手法、自動最適設計手法の開発を行っている。数値解析手法の検討では、3次元構造を有するNRDガイドを厳密に2次元解析するためのフルベクトル有限要素法(FEM)および有限差分時間領域(FDTD)法の定式化をそれぞれ行っている。特にフルベクトルFEMの定式化では非相反素子の解析・設計のため磁性材料まで含めた定式化を行っている。この新しい定式化により、計算コストを飛躍的に高めることができ、数値解析を繰り返しながら最適構造を見出す自動最適設計法の開発が、実用時間内で行えるようになった。自動最適設計法に関する検討では、モザイク状構造を効率的に設計するため、遺伝的アルゴリズム(GA)、粒子群最適化(PSO)、差分進化法(DE)、ホタルアルゴリズム(FA)、ハーモニーサーチ(HSA)をそれぞれバイナリ最適化問題に適用できるように修正・改良し、その性能比較を行い、特にHSA、DEが安定して最適解の探索ができることを示している。実際に、本手法を用いてNRD集積回路を構築する上で重要な多数の基本素子の最適構造を見出している。本論文で開発した自動最適設計法は、目標とする特性を与えるだけで最適な構造を自動的に創出することが可能であり、技術開発が進むミリ波・THz波帯の高性能素子を効率的に開発するのに役立ち、ミリ波・THz波技術が大きく進展させるものと期待される。

本論文で得られた知見は、通信の発展に大きく寄与するものであり、博士(工学)の学位を授与するに値するものと認められる。