

A Study on Metamaterial Transmission Lines for RF and Microwave Applications

Chu Ba Hien

(論文の内容の要旨)

本論文ではメタマテリアル伝送線路と呼ばれる特殊な構造をした伝送回路を用いて、従来では不可能であった特性をもつ高周波デバイスを作る方法について検討している。

LC 回路素子を組み合わせて電氣的に小さなセルブロックを作り、それらを積み重ねた構造に電磁波を入射させると素子の組み合わせによっては、特定の周波数帯において特異な反射・透過特性を持つようになる。この特性は、等価的には自然界には存在しない負の電気定数をもつような媒質を作ることができることを示しており、今までとは異なる物理的な性質を使って各種の応用が考えられる。こうした材料をメタマテリアルと呼んでいる。

メタマテリアルの理論的な研究は古くから行われてきたが、1999 年に微小の導体ワイヤと導体リング素子の組合せで作った周期構造によって、等価的に負の電気定数をもつ媒質を物理的に実現可能であることが示されて以来、多くの研究者の注目を浴びている。

本研究は、古典的な伝送線路の等価回路理論を拡張し、複数の LC 素子を組み合わせて直並列の共振回路を組み込むことにより、従来では考えられなかったような小型で高性能な高周波マイクロ回路素子を作り出している。

最初に、1 つの伝送線路で複数の通過帯域を持つ **Extended-Composite Right/Left-Handed Transmission Line (E-CRLH TL)**を提案し、その伝搬特性を理論的に解析して通過周波数帯域の設計法を示している。その設計例として **E-CRLH TL** をアンテナ素子として、移動体通信に使われる 4 つの通過周波数帯域をもつ小型アンテナの設計を行い、実際に作成によってその妥当性を検証している。

加えて広周波数帯域で使用可能な **Vivaldi** アンテナを解析し、その使用下限の周波数を推定する理論式を提案し、その妥当性を検証した上で、アンテナ前方に **Zero-index metamaterial (ZIM)**と呼ばれるメタマテリアル素子を層状に配置することにより、アンテナの放射利得を更に向上させるための新しい手法について検討している。

(論文審査の結果の要旨)

・論文の主題 (テーマ)

メタマテリアル伝送線路理論を応用した新しい高周波マイクロ波用のアンテナ素子の開発

・当該研究分野における位置づけ

高周波マイクロ波デバイスは、さらなる小型化、高性能化を目指して研究が進められている。その中で、小型無線機器端末の送受信素子として使われるアンテナは、通常使用周波数の4分の1波長程度の寸法がないと、効率のよい動作が望めないというのが一般的であり、機器の小型化を妨げる問題の一つである。また複数の使用周波数帯域を持つアンテナはその構造が複雑になり、これも小型化を困難にしている一因でもある。

本論文では、15年ほど前に新しく提唱されたメタマテリアル伝送線路理論を拡張して新たな伝送線路回路を提案し、従来にない特性をもつ小型のアンテナ設計を試みている。

・論文の構成

第1章 Introduction

最初に研究背景、本研究の目的について説明し、本論文の構成を示している。

第2章 Metamaterial transmission lines

最初にメタマテリアル伝送線路理論について概説している。複数のLC共振回路を伝送線路内に組み込んだ新たな **Extended-Composite Right/Left-Handed Transmission Line (E-CRLH TL)** を提案し、従来提案されている伝送線路との違いを説明している。そしてその伝搬特性を理論的に解析して、それぞれのLC共振回路に対する共振周波数を操作することによって複数の通過周波数帯域をもつ伝送線路を作り出す手法について説明している。更にその伝送線路の応用としてアンテナ素子の設計を行い、移動体無線通信に使われている4つの通過周波数帯域をもつ小型アンテナを設計し、実際にそのアンテナを試作することによってその手法の妥当性並びに実現性について検証している。

第3章 Resonant metamaterials

この章では、アンテナの利得を良くするためにメタマテリアル材料を使用することを検討している。広い周波数帯域で使用可能な **Vivaldi** アンテナに注目し、その設計を検討する上で重要となる使用下限の周波数を推定する理論式を提案し、その妥当性を数値シミュレーションと実測で検証している。さらにそのアンテナの放射利得を向上させるためにアンテナ前方にメタマテリアル素子を配置する新しい手法について検討している。そのために共振型のメタマテリアルとして知られている **Zero-index metamaterial (ZIM)** を単位セルとする材

料に注目し、そのセルのもつ非等方性の伝搬特性を勘案して Vivaldi アンテナの前方に層状に並べることによって放射指向性を制御し利得を高める方法を提案している。

第4章 Conclusions and future works

第3章までの研究内容を総括し、今後の課題について述べている。

・論文の独自性や成果および課題

本論文では、新たに提案したメタマテリアル伝送線路をアンテナ素子として用いることを提案し、今までにない小型でかつ高性能なアンテナを設計できることを示している。E-CRLH TL を使用した小型アンテナは、数値シミュレーションに基づき設計した上で、実際にそのアンテナを試作することにより、移動体通信端末用の4つの周波数帯域をもつ小型アンテナの開発に成功している。今後は5つ以上の周波数帯域をもつ場合への拡張性やさらなるアンテナ利得の改善が課題となる。また非等方性をもつ ZIM を単位セルとしてアンテナ前方に層状に並べることにより、アンテナ利得を広い周波数にわたって高める方法は、様々なアンテナへの適用が可能であり、さらなる研究が期待される。

・論文の評価

以上、本論文で得られた知見は、新しい高周波マイクロ波帯用の小型アンテナの開発に重要なものであり、今後の小型アンテナの発展に貢献するものと考えられる。よって本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。