自然・超自然系材料から成る低姿勢アンテナ の実現

阿部, 智希 / ABE, Tomoki

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

78

(発行年 / Year)

2022-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675甲第539号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2022-03-24

(学位名 / Degree Name)

博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025232>

博士学位論文
論文内容の要旨および審査結果の要旨

論文題目	自然・超自然系材料から成る低姿勢アンテナの実現		
氏名	阿部 智希		
学位の種類	博士（工学）		
学位番号	第 539 号		
学位授与年月日	2022 年 3 月 24 日		
学位授与の要件	法政大学学位規則第 5 条第 1 項第 1 号該当者（甲）		
論文審査委員	主 査	山内 潤治	教授
	副 査	柴山 純	教授
	副 査	中野 久松	名誉教授（法政大学）

1. 論文内容の要旨

情報通信社会の高度化に伴い、高速、高性能で、高い信頼性を有する無線通信を実現するために、アンテナの研究はより重要なものとなっている。喫緊の課題の一つに、低姿勢化が挙げられる。アンテナの低姿勢化は、無線通信機器全体の小型化・軽量化および移動体の空気抵抗削減などに貢献し、アンテナの応用範囲を拡大する。しかしながら、一般に、アンテナの低姿勢化はアンテナ特性（特に、入力インピーダンス）の悪化を招く。このことを解決するために、メアンダ構造体、誘電体、磁性体、電波吸収体の使用等、これまでに幾つかの検討が行われてきている。これらの低姿勢化技術は、アンテナアーム上を流れる電流の伝搬位相定数が正であるものに対して行われている。このようなアンテナは自然系アンテナと定義される。

低姿勢構造を有する自然系アンテナに加え、近年、超自然系材料（メタマテリアル）を使用した低姿勢アンテナが注目を集めている。メタマテリアルは、波長に対し小さい素子を周期的に配列することによって構成される。このメタマテリアル構造は、自然界に存在する材料（自然系材料）では成し得ない特性を実現し得る。

右左手系複合伝送線路（CRLH-TL）は、メタマテリアルから成るアンテナの一つである。約 0.01 波長の超低姿勢構造を有する CRLH-TL は、遷移周波数より低い周波数帯域において負の伝搬位相定数を、高い周波数帯域において正の伝搬位相定数を実現する。これまでに、CRLH-TL の放射概念を利用したラインアンテナ、ループアンテナ、スパイラルアンテナ等が検討されている。

こうした背景のもとに、本論文では、低姿勢アンテナの高性能化（広帯域化、複数帯域動作、高利得化、円偏波放射、ビーム走査等）について研究成果を述べている。本論文は 6 章で構成されており、各章の概要は次の通りである。

第 1 章では、自然・超自然系材料から成る低姿勢アンテナに注目が集まっている現状を踏まえ、低姿勢アンテナの高性能化（広帯域化、複数帯域動作、高利得化、円偏波放射、ビ

ーム走査等)が、次世代の無線通信システムを構築するための課題となっていることを述べている。本研究で自然・超自然系材料から成る新しい低姿勢アンテナを考案する位置づけと目的を明示している。

第2章では、回転対称体 (BOR) 素子およびメアングラ状寄生素子から成る低姿勢・小形・超広帯域アンテナを対象としている。このアンテナは、従来アンテナより小さなアンテナ体積をもって、他のアンテナを超える約 179%の超広帯域特性を有するように検討されている。本章では、はじめに、BOR 素子の周囲に4つの直線状寄生素子を配置し、低周波数領域におけるインピーダンスを改善している。次に、直線状寄生素子を屈曲することにより、上部面積の縮小化を行っている。最後に、低周波数領域におけるインピーダンスのさらなる改善のために、屈曲した寄生素子にメアングラ構造を導入している。このとき、VSWR が2以下となる下限周波数 2.78 GHz におけるアンテナ高は約 0.09 波長と低姿勢になっている。

第3章では、第2章において用いた BOR 素子にマッシュルーム形寄生素子を付加した低姿勢・高利得・広帯域ビーム走査アンテナを検討している。はじめに、BOR 素子の周囲にマッシュルーム形寄生素子を円形に配列している。これにより、寄生素子の接地板に対する状態 (開放または短絡) を制御し、方位面内におけるビーム走査を達成している。次に、利得の広帯域化を目的とし、寄生素子の配列を二列にしている。最後に、アンテナを試作し、検討結果の妥当性を実験により確認している。このアンテナは、方位面内において、10 dBi 以上の高利得指向性ビームを、従来よりも広い帯域 (45%) にわたって走査できる、という特長を有する。

第4章では、低姿勢二線アルキメデススパイラルアンテナを使用した円偏波ビーム走査に成功している。本章では、はじめに、円偏波軸ビームおよびコニカルビームの放射電界強度および位相分布を明らかにしている。その後、軸ビームとコニカルビームとを重畳することによって、チルトビームを形成している。このチルトビームは、二つのアームに印加する給電電圧比の変化に伴い、方位面内を移動する。給電電圧比からチルトビームの最大放射方向を推定する簡易な方程式をも導出している。以上により、このアンテナは、従来4以上の給電点が必要であった円偏波ビーム走査を、2つの給電点によって可能ならしめている。

第5章では、低姿勢複合メタマテリアルループから成る円偏波ビーム走査アンテナを開発している。このアンテナは、従来単一の周波数帯域においてのみ達成されていた円偏波ビーム走査を二つの周波数帯域において達成している。本章では、はじめに、二種類のメタアトム (C-type メタアトムおよび N-type メタアトム) から成る MetaLPA-axial を検討し、二つの設計周波数において、MetaLPA-axial が反円偏波軸ビームを放射することを明らかにしている。次に、C-type メタアトムから成る円周約二導波波長 MetaLPA-conical を検討し、二つの設計周波数において、MetaLPA-conical が反円偏波コニカルビームを放射することを明らかにしている。最後に、MetaLPA-axial の外側に MetaLPA-conical を同心状に配列した MetaLPA-plus を考察している。二つのメタループアンテナを同時に励振することによって、反円偏波チルトビームを形成している。このチルトビームは、給電位相の変化に伴い、方位

面内を移動することを実証している。

第6章では、本研究で得られた成果を要約している。

2. 審査結果の要旨

本論文は、自然・超自然系材料から成るアンテナに注目し、低姿勢構造と高いアンテナ性能（広帯域、複数帯域動作、高利得、円偏波放射、ビーム走査）とを具備する新しいアンテナを開発している。口頭試問を含む審査の結果、下記の点において新規性と工学的有効性を確認した。

1. 回転対称体（BOR）アンテナの高性能化

BOR アンテナは、広帯域特性を有する素子として知られてきたが、本論文ではさらなる広帯域化、低姿勢化、小型化を実現している。

(1-1) 前例のない三つの厳しい条件（①170%以上帯域、②下限周波数で 1/10 波長以下となる低姿勢化、③1/20 波長四方の小形化）を目標に掲げ、4本の寄生素子を BOR アンテナの周りに配置し、その形状を蛇行化することで上記目標を達成した点に創意工夫が見出せる。

(1-2) 新たにマッシュルーム形状の寄生素子を BOR アンテナの周囲に導入し、寄生素子を開放、短絡させることでビーム走査が可能であることを明らかにした。移相器を用いず、ビーム走査を達成したことは工学的に有意義である。加えて、10 dBi の高利得特性、30%以上の広帯域特性、1/6 波長以下の低姿勢化を同時に達成したことは評価できる。

2. アルキメデススパイラルアンテナを用いた円偏波ビーム走査

低姿勢二線式アルキメデススパイラルアンテナから放射される円偏波ビームを走査する手法を検討している。平衡モードと不平衡モードの放射を解析し、二つのモードの位相分布を定式化している。この位相分布を用いて、走査ビームの最大放射方向を簡易に推定できる式を導出している。市販のシミュレーションソフトウェアによる数値解析の反復に比べ、圧倒的に少ない計算負荷で放射方向の推定を可能にした点に有効性が見出される。

3. 複合メタマテリアルループを用いた二帯域円偏波ビーム走査

メタアトムと称する、二種類のサブ波長素子の周期配列をループアンテナに応用し、円周長に応じて軸ビーム放射とコニカルビーム放射を可能としている。特に、自然系アンテナでは得られない、二つの設計周波数で異なる円偏波ビームが生成されることを見出した点に新規性がある。さらに、給電位相の調整により円偏波ビームが走査できることを理論と実験から確認している。

以上、本論文で提案された自然・超自然系材料から成るアンテナは、低姿勢構造と高いアンテナ性能（広帯域、複数帯域動作、高利得、円偏波放射、ビーム走査）を実現しており、工学に資するところが大きい。よって、本審査小委員会は全会一致をもって提出論文が博士（工学）の学位に値するという結論に達した。

（報告様式Ⅲ）