

博士学位論文審査要旨

2019年7月23日

論文題目：リフレクトアレーアンテナの広帯域化および偏波特性制御のための
高性能共振素子形状に関する研究

学位申請者： 東 大智

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 出口 博之

副査： 理工学研究科 教授 辻 幹男

副査： 理工学研究科 教授 岩井 誠人

要 旨：

本論文は、広帯域かつ低交差偏波特性を有する直交偏波共用リフレクトアレー共振素子、広帯域偏波変換特性（円偏波変換および直交偏波変換）を有するリフレクトアレー共振素子、および直交二偏波間において任意反射位相差を有するリフレクトアレー共振素子を各々提案するとともに、それらを開口面アンテナに応用した研究成果についてまとめたもので、7章より構成されている。

第1章では、本論文の研究の目的、ならびに今日まで行われてきた研究の概要を基にリフレクトアレーアンテナの開発の経緯、特性、課題などについて述べることにより、本研究の背景を明らかにしている。

第2章では、リフレクトアレーの動作原理について示し、リフレクトアレー素子の設計に用いるモーメント法による共振素子の電磁界解析の概要について述べている。

第3章では、まず直交する偏波の入射波に対して両偏波をほぼ独立に制御できる素子として、単位セル内に直交配置した Ω 型形状の2共振ストリップ素子を提案している。また、単位セル内で交差偏波成分が生じない4軸対称配置した2共振オープンループ共振素子を提案し、広帯域ならびに低交差偏波特性を実現している。そして、Ku帯においてオフセット給電単層リフレクトアレーの設計、試作を各々行い、放射特性の数値的・実験的評価によって提案素子の有効性を検証している。

第4章では、前章で提案した Ω 型素子が、直線偏波から円偏波への変換素子にも適用可能なことを示すとともに、これらの素子を用いてリフレクトアレーアンテナの設計を行っている。そして、その試作および実験を行い、放射パターンの円偏波特性の評価から提案素子の有効性を検証している。

第5章および第6章では、リフレクトアレー共振素子の遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm: GA）による設計について述べている。まず、第5章では、直交偏波変換の原理に基づきGAによる設計の評価関数を示し、任意形状素子によって広帯域にわたって良好な直交偏波変換特性が得られることを明らかにしている。次に、第6章では、直交する2偏波間において任意の反射位相差を有する任意形状共振素子群を提案している。このような両偏波独立制御によれば、例えば偏波によって焦点位置を変えたアンテナを設計できることを示し、放射特性の数値的・実験的評価により、提案素子および本設計法の有効性を検証している。

第7章では、本論文全体の結論の要点をまとめ、その新規性、将来性を示している。最後に、御指導ないし、御協力を頂いた方々に対する謝辞を述べている。

以上のように、本論文で行ってきた著者の研究は、学術面における幾つかの重要な成果を挙げているのみならず、高性能な開口面アンテナを実現するための先駆的かつ実用的な研究であり、この分野の発展に多大なる貢献をなすものである。

よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2019年7月23日

論文題目：リフレクトアレーアンテナの広帯域化および偏波特性制御のための
高性能共振素子形状に関する研究

学位申請者： 東 大智

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 出口 博之

副査： 理工学研究科 教授 辻 幹男

副査： 理工学研究科 教授 岩井 誠人

要 旨：

本論文提出者は、2015年4月より2019年3月まで、同志社大学大学院理工学研究科博士課程後期課程に在学していた。本論文の主たる内容は、Progress In Electromagnetics Research M に1編、電子情報通信学会論文誌に1編、Advances in Antenna Engineering and Wireless Systems Research に1編、Online Journals IEICE Communications Express に2編、Proceedings of IEEE AP-S International Symposium に5編、Proceedings of IEEE International Workshop on Electromagnetics に1編、Proceedings of IEEE International Conference on Computational Electromagnetics に1編掲載され、すでに十分な評価を受けている。

2019年7月22日15時より、約2時間にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開かれ、種々の質疑討論が行われたが、提出者の的確なる説明により、十分な理解が得られた。さらに、講演会終了後、審査委員により論文に関連した諸問題、および電気工学、電子工学の基礎ならびに応用分野に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、十分な学力を確認できた。提出者は、英語の語学試験に合格し、国際会議においても英語で数多くの発表を行っており、十分な語学能力を有するものと認められる。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： リフレクトアレーアンテナの広帯域化および偏波特性制御のための
高性能共振素子形状に関する研究

氏名： 東 大智

要旨：

近年、通信システム発展に伴い、衛星通信を利用した通信網の整備や新たな通信ネットワーク構築など、通信衛星におけるアンテナの役割は増大している。現在の衛星通信・放送などの長距離無線システムにおいては、高利得アンテナが必要不可欠となっており、このような用途で用いられるアンテナとして、パラボラ反射鏡アンテナやアレーアンテナがある。パラボラアンテナは、放物曲面状の金属反射板と、幾何学的に決定される焦点位置に配置された一次放射器とが対向する構成となっており、比較的 low コストで高利得特性を実現するアンテナとして広く普及している。衛星通信用の反射鏡アンテナには、直交偏波共用アンテナやマルチビームアンテナ等の高性能な開口面アンテナが求められる。一般的に、人工衛星に搭載されるパラボラアンテナは、折り畳まれた状態で宇宙空間に打ち上げられ、宇宙空間で展開されるため、反射板を展開するための機構を含む複雑な構造が必要となり、無線通信時の動作信頼性が低くなる。また、ビーム走査を行う場合は、装置を機械走査する方法に限られる。一方、フェーズドアレーは、個々のアンテナ素子を電子的に独立に制御する事が可能となるため、高速ビーム走査が可能であるが、移相器や増幅器が必要になり、複雑なモジュールになるため、実装コストもかかる。

そこで近年、パラボラ反射鏡に替わるアンテナとして、リフレクトアレーアンテナが注目されている。リフレクトアレー技術の概念は、1963年にBerryらにより、導波管タイプの素子を用いて構成されたものが初めて提案され、1980年代後半に低姿勢の平面アンテナでも構成できる事が分かり注目され始めた。リフレクトアレーは、裏面に地導体を有する誘電体基板上に二次元配列された複数の導体共振素子から構成され、平面型の簡易構造で実現される。アンテナ開口面上に共振素子を適切に配列することで、開口面位相分布を制御することが出来るため、空間給電された球面波を平面波として所望方向へ放射可能となり、容易に高利得特性が得られる。また、反射鏡面を放物面から平面にすることにより、衛星搭載用大型アンテナにおける展開構造の信頼性が飛躍的に向上することに加え、その構造上、重量や製作コストの点においても、従来の反射鏡アンテナより優れている点が多い。これらの特徴を活かし、衛星搭載用展開アンテナのみならず、山間部やビル間のような電波不感地帯等を解消するための方向制御反射板などへの応用が検討されている。しかしながら、一般的に、リフレクトアレーは共振現象を利用した波面制御を行うため、狭帯域特性になるという問題を抱えている。そのため、広帯域化が課題となる。また、実際の通信環境における通信容量の増大などによる偏波共用技術や、対象とする様々な空間での電波伝搬環境の改善を行うための偏波制御技術の開発も重要となる。リフレクトアレーの性能は、共振素子の性能に大きく依存する。従って、上記のような課題を解決するために、リフレクトアレーに用いる共振素子の周波数特性改善や多機能化に関する研究が盛んに行われている。

リフレクトアレーの広帯域化に関しては、正方形パッチアレーを多層構造にし、各層のパッチサイズ、比誘電率や厚みを最適化することで、緩やかな共振特性となり、十分な反射位相量を確保している。しかし、多層構造の場合、重ね合わせによる製作誤差や重量増加などの問題から、単層構造で広帯域特性を実現するリフレクトアレー素子形状に関する研究が行われて

いる。一つの直線偏波に対しては、直線のマイクロストリップ素子を密配列し素子間結合を利用する方法や単位セル内に2共振あるいは3共振素子を配置することで広帯域化を実現している。直交偏波共用を実現するために、各偏波方向に対して動作する5共振ストリップ素子を配置した形状が提案されており、さらに、単位セル内でストリップ素子を凸型に変形し上下左右に配置する事も検討されている。ストリップ素子以外にも、サイズの異なる方形ループ素子を複数配置する単位セルやフェニックスセルを用いた直交偏波共用素子も提案されているが、更なる広帯域化が大きな課題である。また、実際の電波応用システムでは、その方式等によって求められる電波の制御は様々であり、衛星通信・放送などでは、円偏波発生のための偏波変換技術の開発も課題となる。従来より、透過型構造における直線-円偏波変換技術においては、メアングラインを用いた偏波変換板、ストリップ素子を周期配置した偏波変換板などが報告されている。一方、反射型構造においても、地導体を装荷した誘電体基板上にメアングラインを配置した構造、同一形状の方形パッチ素子を周期配列した構造や各入射偏波に対して動作するダイポール素子を各層に配列した多層構造の偏波変換板等が提案されているが、これらの構造では、波面制御までは行うことが出来ない。そこで、偏波変換機能を有するリフレクタレー共振素子についても研究が行われている。偏波変換機能を持たせることで、波面制御によるビーム方向制御やビーム成形を行いながら、偏波変換が行えるアンテナが構成可能となり、アンテナとしての利用価値が向上すると考えられる。一般的に、円偏波を直線偏波に変換することは容易であるが、直線偏波から円偏波を生成するのは難しい。リフレクタレーにおいて偏波変換を実現する際には、開口面位相分布を制御するために十分な反射位相量を有する素子群の設計に加え、各素子に対して良好な円偏波変換特性を実現する事が要求される。近年、エルサレムクロス形状とオープンループ形状の素子を単位セル内で組み合わせた単層構造偏波変換素子や実時間遅延を用いた多層パッチ構造が提案されているが、いずれも広帯域化が課題となる。さらに、直線-円偏波変換のみではなく、直交偏波変換板についても、透過型および反射型構造が報告されている。透過型では、ループスロット型/パッチ型のFSSを多層構造で構成し、直交偏波変換空間フィルタとして動作させるための設計法や、それらが無指向性アンテナに応用した例が報告されている。反射型においても、単層構造でパッチ素子を用いた直交偏波変換板や、二つの同一形状のV字型ストリップ素子を対向配置することで、複数共振特性が得られ、広帯域特性が得られる素子が考案されているが、波面制御を行わないものばかりである。また、遺伝的アルゴリズムを用いた最適化設計を行うことにより、良好な直交偏波変換特性が得られている。しかしながら、上記提案素子は偏波変換のみを考慮する場合には有用だが、波面制御を行うためには、 360° の範囲の反射位相量を確保する事が課題となる。最近では、波面制御のかわりに、同相と逆相の反射位相のみで構成する1-bit リフレクタレーが検討されているが、利得低下が大きいという問題がある。

本論文では、このような背景を踏まえ、高性能なリフレクタレー共振素子の研究開発を行い、広帯域かつ低交差偏波特性を有する直交偏波共用リフレクタレー共振素子の開発、広帯域偏波変換特性(円偏波変換及び直交偏波変換)を有するリフレクタレー共振素子の開発及び直交二偏波間において任意反射位相差を有するリフレクタレー共振素子の開発及びその応用についての検討を行っている。

まず、広帯域にわたり低交差偏波特性を有するリフレクタレー共振素子として、 Ω 型形状および4軸対称形状の2種類の素子を提案する。前者は、従来の凸型形状を基に凸部分を低くし、入射電界に平行となるようにストリップ素子形状を Ω 型に変形した新たな素子形状である。提案形状では、十分な素子長を確保する事に加え、凸部を低くし、各素子形状自身に軸対称性を持たせることで交差偏波成分を低減させることで、広帯域低交差偏波特性を実現している。後者は、更なる低交差偏波化を図るため、単位セル自体に4軸対称性を持たせた素子配置を行う事で交差偏波を抑制した4軸対称共振素子形状である。 Ω 型形状および4軸対称形状ともに、2共振

ストリップ素子を使用する事で、直交偏波において広帯域特性を実現している。次に、直交偏波共用素子である Ω 型素子を用いて、直線-円偏波変換特性を有するリフレクトアレー素子を実現し、広帯域にわたり良好な円偏波変換特性を実現出来ることを明らかにしている。また、直交する二つの直線偏波間で $\pm 180^\circ$ の位相差を実現してかつ、 360° の反射位相量が得られれば、直交偏波変換素子も実現できるが、偏波間の位相差が大きい場合、所望の直交偏波変換特性を実現する事は容易ではない。このような場合、最適化設計による素子設計が有効な手段となる。そこで、遺伝的アルゴリズムを用いて、共振素子の最適化設計を行うことで、広帯域な直交偏波変換リフレクトアレー共振素子群が得られる事を明らかにしている。そして、上記提案素子を用いてオフセット給電リフレクトアレーをKu帯で設計、試作し、放射特性の計算値および測定値を比較することで、広帯域な直交偏波共用リフレクトアレー素子及び偏波変換リフレクトアレー素子としての有用性を示している。最後に、円偏波変換および直交偏波変換リフレクトアレー素子の更なる応用として、直交する直線二偏波間において、任意の反射位相差を有する共振素子群が設計可能であることを示し、各偏波を独立制御できることを明らかにする。本論文では、両偏波独立制御の新しい応用例として、異なる焦点を持つリフレクトアレーが単層構造で実現できる事を明らかにしている。

このように、広帯域特性や偏波変換特性を有するリフレクトアレー共振素子の開発を行い、それら提案素子を用いて設計・試作したリフレクトアレーアンテナの放射特性の理論的、実験的検討の研究成果をまとめたものが本論文である。