

京都大学	博士（工学）	氏名	中本 成洋
論文題目	Novel Architectures and an Efficient Calibration Technique for Low-cost and High-performance Phased Array Antennas (フェーズドアレーアンテナの低コスト化と高性能化に向けた新技術の開発)		
(論文内容の要旨)			
本論文はフェーズドアレーアンテナおよび DBF（Digital Beam Forming）アンテナの低コスト化および高性能化のための要素技術に関する研究開発をまとめたものであり、5 章から構成される。 第 1 章は序論であり、研究の背景としてフェーズドアレーアンテナの応用例を述べ、そのさらなる発展と応用分野拡大には、単なる高性能化だけでなく、低コスト化との両立が重要であることを述べている。また、その実現に向け、フェーズドアレーアンテナおよび DBF アンテナの低コスト化技術、ならびにフェーズドアレーアンテナの最適な動作に必要なとなるキャリブレーション技術、特に直交 2 偏波を扱う無線システムで重要となる交差偏波低減のためのキャリブレーション技術に着目し、それら技術に関する従来の研究例を挙げながら、その課題について示し、本研究の位置づけと概要を述べている。 第 2 章では、フェーズドアレーアンテナの低コスト化技術として、従来のパッシブフェーズドアレーにおいて課題であった効率の改善と柔軟なビーム形成に必要なアンテナ素子単位での位相制御の両立を実現する新たな方式のアンテナを提案している。提案アンテナでは、高効率特性が期待できるラジアルライン給電アレーに着目し、その各アンテナ素子を小型モーターにより機械的に回転させることで、素子単位での位相制御を実現している。加えて、その設計のため、アレー等価回路モデルと電磁界解析とを組み合わせた実用的な設計手法を新たに提案している。提案設計手法では、各アンテナ素子に相当する放射アドミタンスを縦続接続した等価回路モデルでラジアルライン給電アレーを表現し、当該等価回路モデルを用い、アンテナ入力端におけるインピーダンス整合とアレー様励振を実現する放射アドミタンスを定める設計式を導出している。当該設計式により求めた放射アドミタンスを実現するアンテナ素子を電磁界解析によって設計し、これを配列することで、従来では困難であったラジアルライン給電アレーの効率的な最適設計を可能としている。168 素子アレーの試作評価によって、提案アンテナにおいて柔軟なビーム形成が可能であるとともに、-17 dB の低反射特性と 77% の高効率特性を実現することを確認し、提案アンテナの実現性と提案設計手法の有効性を示している。提案アンテナは、従来の移相器を用いたフェーズドアレーアンテナと比較すると、ビーム走査速度については劣るものの、低コスト化を実現する代替方式として、マイクロ波電力伝送や衛星通信の分野での応用が期待される。 第 3 章では、DBF アンテナの低コスト化技術である符号分割多重方式のパスシェアリング構造 DBF アンテナに着目し、PIN ダイオードを実装したスロットペアを複数配列した導波管スロットアレーを提案している。提案アンテナでは、スロットペアの各スロットが互いに逆位相の電波を受信する性質を利用し、スロットペアのうち一方のスロットが動作状態、他方のスロットが非動作状態となるように PIN ダイオードを制御し、これを拡散符号に従い高速に切替・制御することで、受信信号の符号分割多重化を実現する。これにより、増幅器、周波数変換回路、アナログ-デジタル変換器を含む RF チャネルの数を削減でき、かつ高効率な中空導波管で信号合成するため、マイクロストリップライン等を用いた従来方式に比べて高効率特性が期待できる。また、理			

京都大学	博士（工学）	氏名	中本 成洋
論解析により、拡散符号に直交符号を用いた場合の提案アンテナの動作原理を示すとともに、信号対雑音比についても分析している。その結果、提案アンテナでは、符号分割多重化後に増幅器で信号増幅をするため、各ペアスロットの分離信号にコヒーレントな雑音信号が重畳し、結果として、アレー合成による利得向上効果が得られない課題があることを明らかにしている。加えて、PIN ダイオード等の電気特性誤差の影響とその改善策について明らかにしている。さらに、8 信号多重を想定した実験と、測定値を用いたシミュレーション評価によって、提案アンテナによる DBF 機能の実現性を示している。提案アンテナは、信号対雑音比に課題があるものの、従来の DBF アンテナに比べて低コストで DBF 機能が実現できるため、到来方向推定などの用途において、その応用が期待される。 第 4 章では、2 点給電の直交偏波共用円形パッチをアンテナ素子とした円偏波フェーズドアレーアンテナの低軸比化を実現する効率的なキャリブレーション手法を提案している。提案手法は、円形パッチのアレー素子パターン測定値の近似関数に基づいており、交差偏波パターンを含め測定値を精度よく近似するため、円形パッチの放射特性を表す円筒波関数を基底関数とし、その線形和で表現される近似関数を採用している。また、ビーム走査性能を向上するためのアンテナ前面に配置した誘電体基板の影響を簡易的に模擬するため、$\cos\theta$ のべき乗で表される修正関数を導入している。さらに、導出した近似関数を用いて、キャリブレーションに必要な増幅器、移相器の制御量を決定する設計式を提案している。提案手法では、円形パッチの両給電ポートを励振した円偏波パターン測定値を用いて近似関数を構築するため、従来必要であった各給電ポートの個別測定が不要となり、キャリブレーションに必要な測定数を従来の 1/2 以下に低減することができる。41 素子アレーを対象とした電磁界解析により、近似関数の構築に必要な計算条件を評価するとともに、提案手法の有効性を確認している。加えて、1024 素子から成るフェーズドアレーアンテナ実機を用いた評価において、$\pm 70^\circ$ の覆域内で、提案手法により軸比が 5.8 dB から 1.9 dB に改善可能なことを確認し、その有効性を示している。提案手法は、原理的にキャリブレーションに伴いアンテナ利得が低下する課題があるものの、特に軸比特性が重視される衛星通信システムなどにおいて、その応用が期待される。 第 5 章は結論であり、本論文で得られた研究成果について総括している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文はフェーズドアレーアンテナの低コスト化・高性能化のための要素技術に関する研究開発をまとめたものである。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 低コストなフェーズドアレーアンテナであるパッシブフェーズドアレー方式において、従来課題であった効率の改善と柔軟なビーム形成機能の両立を実現する方式として、ラジアルライン給電アレーの各アンテナ素子を小型モーターにより回転させる新たな方式のアンテナを提案した。さらに、その設計のためアレー等価回路モデルと電磁界解析とを組み合わせた実用的な設計手法を新たに考案した。提案アンテナによれば、従来のアクティブフェーズドアレーに比べて大幅な低コスト化が可能なことを示し、試作評価において、柔軟なビーム形成が可能であるとともに、77%の高効率特性を実現することを確認し、提案アンテナと設計手法の実現性、有効性を示した。

2. DBF アンテナの低コスト化技術として、PIN ダイオードを実装したスロットペアを複数配列し、これを拡散符号に基づき制御することで、信号の符号分割多重化を実現する導波管スロットアレーによるパスシェアリング構造 DBF アンテナを提案した。また、理論解析により、提案アンテナの動作原理と信号対雑音比を示すとともに、PIN ダイオード等の電気特性誤差の影響とその改善策について明らかにした。提案アンテナによれば、従来の DBF アンテナに比べて大幅な低コスト化が可能であり、また、8 信号多重を想定した試作評価と、測定値に基づく到来方向推定のシミュレーション評価によって、提案アンテナによる DBF 機能の実現性を示した。

3. 2 点給電円形パッチをアンテナ素子とした円偏波フェーズドアレーアンテナの低軸比化を実現する効率的なキャリブレーション手法を提案した。提案手法は、円形パッチの放射特性を表す円筒波関数を基底関数とする近似関数に基づいており、導出した近似関数を用いてキャリブレーションに必要な制御量を決定する設計式を提案した。提案手法によれば、従来必要であった全偏波測定が不要となり、キャリブレーションに必要な測定数を 1/2 以下に削減可能であり、また、実機評価において、提案手法により軸比が 5.8 dB から 1.9 dB に改善可能なことを確認し、その有効性を示した。

以上のように、本論文では、フェーズドアレーアンテナの低コスト化や高性能化に資する新たな方式、手法を提案するとともに、理論的アプローチと実験によって、その性能や有効性を明らかにしており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 8 月 5 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。