

早稲田大学大学院 理工学研究科

外合 29-8

博士論文審査報告書

論文題目

衛星搭載用フェーズドアレイアンテナの高機能化
に関する研究

Study on Design and Implementation of Satellite
Phased Array Antennas

申請者

高橋 徹

Toru Takahashi

2010年2月

衛星搭載用アンテナとして反射鏡アンテナやホーンアンテナが広く使用されてきたが、近年の衛星通信の発展に伴い、アンテナを構成する各素子の位相を電氣的に制御し、ビーム方向を高速に切り替えることによって、高い指向性、高いアンテナ利得、大きなシステム容量を実現するマルチビームフェーズドアレーアンテナが衛星に搭載されるようになった。また、フェーズドアレーアンテナは、電波を利用した衛星リモートセンシングの中心的な存在である合成開口レーダの飛躍的な発展にも貢献している。以上より、システムのより一層の発展にとって、衛星搭載用フェーズドアレーアンテナの高度化が必須の状況である。

本論文は、上記衛星搭載用フェーズドアレーアンテナを実現する上で必要となる要素技術、具体的には、軽量アンテナ設計技術、直交偏波共用アンテナ設計技術、高精度素子電界測定技術、高速素子電界測定技術に関して、申請者が中心となって推進してきた研究開発の成果をまとめたものである。

本論文は、6章から構成されており、以下、各章の概要を述べ、評価を加える。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的を明らかにするとともに、本論文の概要について述べている。

第2章「メッシュ地導体を用いたマイクロストリップアンテナ設計法」では、衛星搭載用フェーズドアレーアンテナの軽量素子として、展張方式マイクロストリップアンテナを提案し、その設計手法を示している。申請者らは、放射導体と地導体にメッシュ状材料を用いるとともに、それらの間に誘電体基板を介さない構造からなる、超軽量で、かつ熱環境の変化に起因するバイメタル状態を解消するなどの機械構造上の利点を有するアレーアンテナを開発した。申請者は、地導体のメッシュ化が共振周波数の低下や前方放射対後方放射比の劣化を引き起こす課題に対処すべく、メッシュ地導体を有するマイクロストリップアンテナの設計に有効かつ簡易な解析手法として、摂動法を用いた2種類の近似解析法を提案している。第一の解析手法は、メッシュ地導体からの放射損を静電近似により求める方法であり、共振周波数を解析的に閉じた形で表現することが可能である。もうひとつは、メッシュ地導体を無限周期アレーと見なし、積分方程式を解くことによって放射損を求める手法であり、第一の方法と比較すると、より精度の高い結果を求めることが可能である。なお、提案手法により求めた共振周波数、インピーダンス特性および後方放射パターンを、測定値と比較することによって、提案した解析手法の有効性を確認している。

提案手法は、衛星搭載用軽量アンテナであるメッシュ地導体を有するマイクロストリップアンテナの設計に適するとともに、モーメント法や時間領域差分法などの厳密な数値解析手法と比較すると、大幅に設計時間を短縮することから、将来の大型フェーズドアレーの素子アンテナの設計へ貢献できると判断できる。

第3章「直交偏波共用マイクロストリップアンテナの給電点摂動による低交差偏波設計法」では、良好な低交差偏波特性を実現する新たな設計法を提案している。フェーズドアレーアンテナの素子として直交偏波共用マイクロストリップアンテナを用い、直交偏波に対応した2つの給電点間に発生する相互結合による交差偏波を低減するための設計

法として、アンテナ中心に対して点対称な位置に給電点を設ける方法、2素子ペアで構成する方法、シーケンシャルアレーによる方法などが提案されているが、給電回路が複雑化し、広角ビーム走査を行うフェーズドアレーアンテナに対する適用が困難であるとともに、低交差偏波を実現する最適設計条件が見通しの良い形で示されていないという課題があった。

このような状況を鑑み、申請者は、直交偏波共用マイクロストリップアンテナにおいて、2つの給電点を互いに直交する位置から摂動させることにより、意図的に交差偏波成分を発生させ、直交給電点間の相互結合により発生した交差偏波成分を打ち消す設計法を提案し、この給電点摂動量の最適設計条件を解析的に明らかにしている。提案した設計法は、特別な給電回路を必要としない簡易なものであり、直交偏波共用マイクロストリップアンテナをフェーズドアレーアンテナの素子として用いる場合に有効である。さらに、厳密手法に基づく数値計算結果と実験結果に基づき、提案した設計法および最適設計条件の有効性を確認している。

提案した設計法は、主偏波の特性劣化を誘発しないなどの特徴を有するとともに、実装面積が制限されるフェーズドアレーアンテナに対して有効な設計法であり、高く評価できる。なお、提案設計法は実用の衛星通信用フェーズドアレーアンテナの素子に対して適用されている。

第4章「素子電界ベクトル回転法の測定精度の理論検討」では、素子電界ベクトル回転法(REV法; Rotating Element electric field Vector method)における測定精度を理論的に明らかにし、高精度な素子電界測定を実現するための設計指針を示している。REV法は、測定対象となる素子の励振位相を360度変化させたときのアレーアンテナの合成電力の変化が余弦状になることを利用して、素子電界の相対振幅と相対位相を測定する効果的な手法であるが、測定精度に関しては、ほとんど議論がなされていない。また、素子電界の測定精度は、フェーズドアレーアンテナを構成する各素子が放射する電界を同相で合成するためのキャリブレーションの精度に大きな影響を与える。

申請者は、測定精度に影響を与える誤差要因が、各素子に接続されるデジタル移相器の通過特性誤差と測定系熱雑音であることに着目し、これら要因による測定誤差を理論的に明らかにしている。具体的には、REV法におけるアレー合成電力の確率密度分布と素子電界における振幅と位相の測定誤差を、デジタル移相器の通過特性誤差と理論的に関係づけ、測定誤差を簡潔な形で表現可能な理論式の導出に成功した。次に、上記理論を拡張し、測定系熱雑音と測定誤差の関係を理論的に明らかにした。さらに、上記理論に基づきREV法を実行するための測定系の回線設計指針を示すとともに、その有効性を実験により確認している。

以上より、フェーズドアレーアンテナ設計時において所望の測定精度を実現するために必要なデジタル移相器の諸元と測定系の設計指針を明らかにしたことは評価できる。上記理論に基づく測定法は既に実用に供されており、さらに自己診断測定系を組みこんだフェーズドアレーアンテナを搭載した衛星の打ち上げも計画されている。

第5章「複数素子に対する高速素子電界測定法」では、第4章で取り上げたREV法

のもうひとつの課題である測定時間の短縮を目的とした新しい測定法を提案している。本測定法は、衛星搭載フェーズドアレーアンテナを構成する各素子の電界の変化を、衛星運用中に短時間で測定し、キャリブレーションにより特性変化を逐次補正することによって、アンテナビームの高精度な形成維持を目的としたものである。REV法以上に測定時間を短縮する方法として、Toggled MethodやMEP(Multi-Element Phase-toggle)法などが提案されているが、アレー合成電界の高精度な位相測定を必要とするため、衛星軌道上でのキャリブレーションには適用できないという課題がある。また、測定の高速度に伴う測定精度の劣化についての議論はなされていない。

上記観点から、申請者は、REV法における測定時間の短縮に着目した。具体的には、複数の素子の励振位相を互いに異なる位相間隔で同時に変化させたときのアレー合成電力の変化を測定し、その結果に対して演算処理を施すことによって当該素子の素子電界を求める方法を提案するに至った。提案方法は、一つの測定結果から複数の素子電界を同時に求め、従来のREV法の課題であった測定時間の短縮を可能とする。さらに、測定時間を短縮する代償として測定誤差が増大することを指摘し、測定誤差を求める理論式を導出することによって、測定する素子数と測定誤差の関係を理論的に明らかにしている。なお、理論式の有効性は実験により検証している。

上記測定法は、従来のREV法と同様にアレー合成電力の振幅測定のみで各素子電界の振幅と位相を求めることができる。高精度な位相測定が困難で、測定時間の短縮が求められる衛星運用上のフェーズドアレーアンテナのキャリブレーションに対して適用可能な有効な測定法として、将来的な貢献が期待される。

第6章「結論」では、本研究において得られた成果を総括している。

以上、要するに、申請者は、衛星搭載用フェーズドアレーアンテナを実現するための要素技術である、軽量アンテナ設計技術、直交偏波共用アンテナ設計技術、高精度素子電界測定技術、高速素子電界測定技術に関する研究に着手し、顕著な成果を挙げた。衛星通信あるいは衛星リモートセンシングの将来的な発展にとって、フェーズドアレーアンテナの高機能化に対する期待は大きい。本論文で列挙された数々の研究成果は、今後の衛星搭載用フェーズドアレーアンテナの開発に大きく貢献するものと考えられる。よって、本論文は、博士(工学)早稲田大学の学位論文として価値あるものと認める。

2010年2月

審査員

主査	早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	高畑 文雄
	早稲田大学教授	博士(工学)(東京大学)	甲藤 二郎
	早稲田大学准教授	博士(工学)(早稲田大学)	前原 文明