

博士論文概要

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

--

フェーズドアレーアンテナ（以下，フェーズドアレー）は，複数個の素子アンテナ（以下，素子），各素子の励振位相を変えるための移相器等から構成される高機能なアンテナである．その最大の特長は電波を送信あるいは受信する方向（以下，ビーム方向）を任意の方向に電子的に走査可能なことである．フェーズドアレーは，このビーム走査特性を生かす形で衛星通信あるいは衛星リモートセンシングの発展に大きな役割を果たしてきた．例えば，低軌道周回衛星を用いた全世界的なセルラー衛星通信システムでは衛星搭載用アンテナとしてフェーズドアレーが適用され，衛星から見た通信エリアが時々刻々変化する通信システムの実現が可能になった．また，衛星リモートセンシング，特に合成開口レーダ（SAR：Synthetic Aperture Radar）では，フェーズドアレーの適用によりスキャン SAR やスポットライト SAR などの観測モードが実現され，広域観測や高分解能化が可能になった．このようにフェーズドアレーは衛星を利用したシステムの発展に大きく関わってきており，将来的にも大きな期待が寄せられている．例えば，近年の衛星通信では，従来持っていた広域性，同報性，耐災害性という利点に加え，災害・緊急時に通信回線を柔軟に確保することが求められている．この要求には電子ビーム走査可能なフェーズドアレーが最も適している．また，衛星リモートセンシングでは，地殻変動などを観測することを目的とした干渉 SAR など新技術の開発が期待されており，フェーズドアレーの高性能化及び高機能化が必要になっている．以上の技術動向を踏まえ，本論文は高機能な衛星搭載用フェーズドアレーを実現していく上で必要となる要素技術の研究開発成果をまとめたものであり，第1章から第6章までで構成されている．以下に各章の概要を説明する．

第1章では，最初に本研究の背景となる技術動向を述べる．次に技術動向から考えられる将来の衛星搭載用フェーズドアレーに必要な要素技術として4つのテーマを取り上げ，それぞれ従来の技術課題を示し，本論文での研究開発の意義を明確にする．第2章以下では，これらの要素技術に対する解決策を提示し，計算機シミュレーション或いは実験により有効性を検証した結果を示す．

第2章では大型の衛星搭載用フェーズドアレーを実現するために必要な軽量アンテナ設計技術について述べる．衛星通信，衛星搭載 SAR，いずれにおいても衛星搭載用アンテナの大型化が近年では必須となっている．大型の衛星搭載用アンテナを実現するためには，アンテナが軽量であることが必要である．これに対し，我々はマイクロストリップアンテナの地導体をメッシュ状にしたアンテナを提案し，その開発を行った．これにより，従来に比べて質量約 $1/3$ のマイクロストリップアンテナを実現した．しかしながら，地導体をメッシュ化することにより，後方放射の増加や共振周波数の低下といった電気設計上の新たな問題が発生する．これらの特性劣化は設計段階で把握することが必要である．しかし，従来の数値解析法による設計では膨大な計算時間及び計算機容量が必要であった．そこで，本論文では摂動法を用いた簡易解析法を提案する．提案手法による解析結果と実

験結果を比較し，地導体をメッシュ材料とする軽量アンテナ設計法として有効であることを示す．提案した解析手法を用いることにより，従来の数値解析手法と比べて設計時間の大幅な短縮が期待できる．

第3章では衛星搭載用フェーズドアレーの直交偏波共用化を実現するための低交差偏波アンテナ設計技術について述べる．衛星通信では通信容量の大容量化のため偏波多重技術が必要となっている．また，衛星搭載 SAR では，複数偏波による散乱特性から散乱体の物理的性質を推測するポラリメトリ技術が必要になっている．これらのシステムを実現するためには，直交偏波共用かつ低交差偏波特性を有する素子が必要である．しかし，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た場合には交差偏波が劣化する問題があった．従来設計法としては交差偏波をキャンセルするための特別な給電回路を設ける手法が知られているが，実装面積の限られるフェーズドアレーには適していなかった．本論文では，直交偏波共用マイクロストリップアンテナにおいて低交差偏波特性を実現する新たな設計法を提案する．提案する設計法は，直交偏波に対応した2つの給電点を互いに直交する位置から撚動させることにより意図的に交差偏波成分を発生させ，これと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ことにより低交差偏波特性を実現する方法である．シミュレーション及び実験により，提案した設計法の有効性を示す．提案する設計法は，特別な給電回路を必要とせず，従来と同等の素子アンテナ構成で低交差偏波特性を実現できる．このため，素子間隔の狭いフェーズドアレーの素子に対して特に有効な設計法である．

第4章では，フェーズドアレーのキャリブレーション技術について述べ，そのキャリブレーション精度を検討した結果を示す．将来発展が期待されるマルチビーム衛星通信や同一地域を複数回観測する干渉 SAR では，高精度なアンテナビーム形成が必要である．しかし，衛星軌道上では熱環境の変化によりフェーズドアレーを構成する送受信モジュールなどの給電系の電気特性が変化する．また，熱変形によりアンテナ開口面が機械的に変形する可能性もある．これらの要因は，衛星搭載用フェーズドアレーにとって利得低下，サイドローブ上昇，ビーム指向方向のずれ等の放射特性の劣化につながる．このため，これらの要因に起因した開口分布の変化を衛星軌道上で測定し，これを再キャリブレーションすることができれば，今まで以上に高精度なビーム形成が可能になる．フェーズドアレーであれば，各素子の放射電界（以下，素子電界）を測定し，この測定結果を元に移相器により位相の補正を行えば，再キャリブレーションが可能である．但し，開口分布の変化を高精度に測定することが必要になる．従来の研究では各素子電界の測定法の提案が主であり，測定精度に関する検討はほとんどなされていなかった．本論文では，各素子電界を測定する方法の一つとして素子電界ベクトル回転法（Rotating Element Electric Field Vector Method, REV 法）を取り上げ，その測定精度について検討する．REV 法における測定誤差の主要因として，ディジ

タル移相器の通過特性誤差と測定系熱雑音が挙げられる。デジタル移相器の通過特性誤差は、REV法の測定原理に基づく本質的な誤差要因である。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、各素子電界の振幅及び位相を求める測定法である。このため、各素子の励振位相を変化させる手段であるデジタル移相器に通過特性誤差があると測定精度が劣化する。一方、測定系熱雑音は測定系そのもので発生する誤差要因である。高精度キャリブレーションを実現するためには、測定系を構築する際の回線設計において熱雑音による測定誤差を把握する必要がある。本論文では、最初にデジタル移相器の通過特性誤差によって発生するREV法の測定誤差を理論的に明らかにする。これにより、本要因による測定誤差を把握できるとともに、高精度測定を実現するのに必要なデジタル移相器の性能を明確化することが可能になる。次に、上記理論を拡張し、測定系熱雑音によって発生するREV法の測定誤差を理論的に明らかにし、REV法を用いた測定系の回線設計指針を示す。デジタル移相器の通過特性誤差、測定系熱雑音それぞれに起因したREV法の測定誤差を実験により評価し、導出した理論で予測される測定精度が実現できることを確認する。これにより、REV法を用いた場合のキャリブレーション精度を把握することが可能となり、所望の精度を実現するためのデジタル移相器及び測定系の設計指針が明確になる。

第5章では、キャリブレーション時間を短縮するための測定法について述べる。従来のREV法は、1素子毎に360度の位相変化が必要であり、測定時間がかかるという問題があった。衛星運用時の再キャリブレーションを想定すると、このことは運用停止時間が長くなることにつながるため、測定時間の短縮が大きな課題となっていた。本論文では、この課題を解決するためにフェーズドアレーの各素子電界を測定するための新しい測定法を提案し、その有効性を実験により確認する。提案測定法では、複数個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アンテナの合成電力の変化を測定する。測定されたアレーアンテナ合成電力の変化をフーリエ級数展開し、その結果を元に演算処理することにより当該素子の素子電界を求めることができる。このため、一つの測定結果から複数個の素子電界を同時に求めることが可能であり、従来のREV法で課題であった測定時間を大幅に短縮することが可能である。例えば、5ビットデジタル移相器を用いた場合には、従来のREV法と比べて最大3分の1まで測定時間を削減することが可能である。また、提案測定法は、アレーアンテナの合成電力の振幅測定のみで各素子電界の振幅及び位相を求めることができる。このため、高精度な位相測定が困難であり、かつ測定時間の短縮が求められる衛星運用時の再キャリブレーションなどに容易に適用可能である。

第6章では、第2章から第5章までで得られた研究開発成果をまとめ、将来の衛星システム実現に向けた展望を述べる。