

|            |  |
|------------|--|
| 氏名         | 鈴木 義規  |
| 授与学位       | 博士(工学)   |
| 学位授与年月日    | 平成17年9月14日                                       |
| 学位授与の根拠法規  | 学位規則第4条第1項                                       |
| 研究科, 専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科(博士課程) 電気・通信工学専攻                     |
| 学位論文題目     | 衛星搭載用マルチビームフェーズドアレーアンテナ給電装置の<br>小形・軽量化の研究        |
| 指導教員       | 東北大学教授 澤谷 邦男                                     |
| 論文審査委員     | 主査 東北大学教授 澤谷 邦男      東北大学教授 杉浦 行<br>東北大学教授 尾辻 泰一 |

## 論文内容要旨

本論文では、衛星通信システムにおける衛星搭載アンテナの性能向上要求に対して、最優先に解決すべき課題である搭載機器の小形・軽量化を実現する手法について検討した。衛星搭載アンテナの構成として、性能・機能の両面から検討した結果、フェーズドアレー給電反射鏡アンテナを選択し、アンテナ実現のキーコンポーネントであるアンテナ給電装置について、小形・軽量化技術を提案し、試作および解析により提案手法を検証した。

第1章は緒言であり、衛星搭載アンテナ技術の変遷と本研究の課題について述べている。

衛星搭載アンテナは、衛星通信システム黎明期のシングルビームの時代から、大容量化・高速化を実現するために、高利得スポットビームを用いたマルチビームシステムへと発展してきた。さらに、展開型の反射鏡の開発により、反射鏡の大開口化が実現され、アンテナ利得・ビーム数ともに増大しつつある。一方、性能面の観点からは、軌道上においてビーム走査のみならず零点制御といった高度なビーム形成の実現、時々刻々と変化する通信トラフィック状況に応じて、RF電力をビーム毎に効率よく分配する機能などが求められる。高度なビーム形成の実現には、有効に複数の放射素子でアンテナ給電部を構成し、形成ビームに応じて各放射素子の励振振幅・位相分布を適切に制御する必要がある。この励振分布制御を担うビーム形成装置(Beam forming network: BFN)は、ビーム数×放射素子数分の極めて多くの振幅・位相制御機能を備える必要となる。RF電力配分実現に関しては、複雑な電力増幅部構成が要求され、ビーム数の増大に応じて急激に重量が増大する。したがって、マルチビームシステムにおいてはBFNを含めたアンテナ給電装置の小形・軽量化が解決すべき課題となる。

第2章では、BFNの小形・軽量化実現に向けて、その機能要素回路であるウイルキンソン型電力分配合成回路、90°ハイブリッド回路、可変減衰回路、可変移相回路の小形構成法について述べている。回路の小形化手法として、集中定数素子を用いた回路構成を選択し、集中定数素子の中で特に占有面積の大きなインダクタに関して、インダクタンス値とその数を減らす回路構成法を提案し、試作によりその動作を確認している。さらに回路面積を維持しつつ、制御性を改善する手法を提案し、試作により動作の確認を行っている。これらの回路構成法は、以降で述べるBFNを構成する際の回路ライブラリとして有用である。

第3章では、BFNの小形・軽量化実現に向けて、第2章で提案した機能要素回路を大規模に集積することにより、32素子アレーの振幅・位相制御を行うための分配合成機能および振幅・位相制御機能を有するMMICを実現し、動作を確認している。開発したMMICの概観を図1に示す。また、BFNに適用するために、

MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)を実装した BFN-MMIC モジュールを開発している。

開発した BFN-MMIC モジュールは、小形化の追求により、回路間の相互干渉の影響や温度変動特性といった振幅・位相制御精度を劣化する要因が予想される。そこで、これらを考慮した振幅・位相制御法を新たに提案している。実験的に検証を行った結果、目標とする $-10^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で、制御誤差の指標とした振幅制御誤差 0.4dB 以内、位相制御誤差  $6^{\circ}$ 以内を実現していることを確認している。

第4章では、第3章で開発した BFN-MMIC モジュールを衛星搭載用ビーム形成装置へ適用するために、マルチビーム化に適した実装方法を検討するとともに、重量・消費電力を抑える BFN 構成および制御方法について検討を行っている。

開発した BFN-MMIC モジュールや本章における検討結果は、我が国の技術試験衛星 VIII 型 (Engineering test satellite 8 : ETS-VIII) 搭載用 BFN に適用した。開発した受信用 BFN の概観を図2に示す。ETS-VIII には同一の要求性能を実現する2種類の BFN が搭載されるが、本 BFN は、他機関の開発した BFN と比較して、寸法、重量および消費電力を 1/3 以下に低減している。なお、電気性能試験等の搭載機器としての認定試験を終えている。

ETS-VIII は 2006 年度に打ち上げが予定されており (2005 年 8 月現在)、移動体衛星通信システム実験に供するとともに、マルチビーム形成実験を行う予定である。

第5章では、衛星通信システムのさらなる大容量化を実現するために、性能向上が求められる搭載アンテナについて、アンテナ特性を維持しつつ、マルチビーム形成部の回路規模を大幅に削減できる線形補間方式を提案している。その基本となるシングルビーム・線上アレーの給電装置構成を図3に示す。線形補間方式は、より現実的なマルチビーム化、平面アレー化に対応可能であることを確認しており、全ての素子を制御する従来構成に比較して、BFN の回路規模を約 30% に削減できる。本提案方式は、小形・軽量化、低消費電力化のみならず、部品点数削減による信頼性の向上の効果も期待でき、大幅なコスト削減につながる。

また、衛星搭載アンテナへの適用を考慮して、フェーズドアレー給電反射鏡アンテナの設計およびアンテナパター

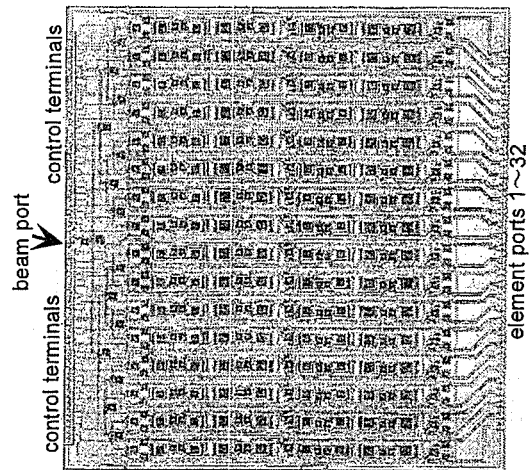


図1 開発した MMIC の外観

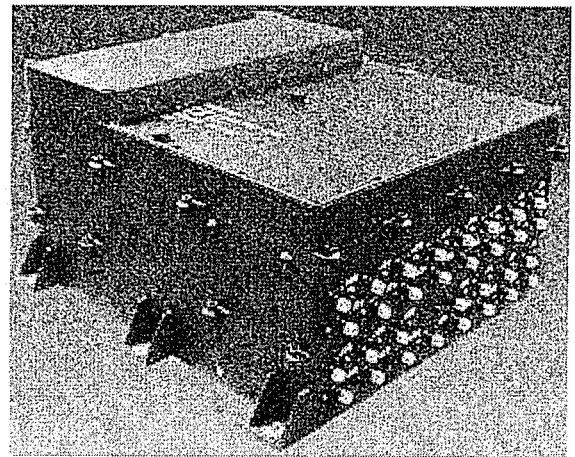


図2 受信用 BFN の外観

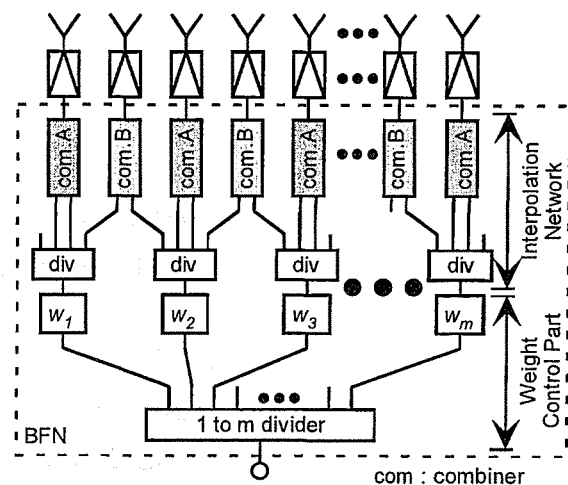


図3 線形補間型フェーズドアレー給電装置の構成

ン解析を行い、線形補間方式がマルチビームフェーズドアレーアンテナ用給電装置の構成法として、有効であることを確認している。

さらに、線形補間の影響を考慮することで、アダプティブアレーの各種アルゴリズムへ適用可能であることを認している。

第6章では、ビーム毎の通信容量が時々刻々と変化するような衛星通信システムにおける送信系給電装置について検討している。この領域は、第5章で述べた手法は対応できないため、新たに給電装置全体の回路模を削減しつつ、要求アンテナ性能およびビーム間の電力配分機能を実現できる構成を提案している。

まず、全体のサービスエリアを複数の広域エリアを分割し、広域エリア内ではビーム形成に使用する励振振分布を共通化することにより、従来の複雑な電力増幅部構成を採ることなく、広域エリアに属するビームについて任意の電力配分比が実現できる。さらに、搭載アンテナの利得を最大化する各広域エリアの励振振幅分布最適化法を確立している。

次に広域エリアを重複させ、重複したエリアにおいてビーム合成することを提案する。これにより、広域エリア間の電力配分が実現できるため、電力配分の自由度が向上する。これら2つの提案技術を実現する給電装置構成を図4に示す。各広域エリア用の BFN における素子毎の出力を合成させ、ビーム合成は信号を任意の電力配分比を行った信号を位相調整した後に、各 BFN に入力する。

衛星搭載アンテナへの適用を考慮して、フェーズドアレー給電反射鏡アンテナの設計およびアンテナパターン解析を行った結果、従来の約半分の装置重量で、利得確保およびビーム間の電力配分を実現できることを確認しており、本提案手法が電力配分機能を実現するマルチビームフェーズドアレーアンテナ用給電装置の構成法として、有効であることを確認している。

第7章では、第2章から第6章までを総括して、結論を述べている。

以上述べたように、本論文では、衛星搭載アンテナの性能向上を目的として、アンテナ給電装置の小形・軽量化を実現する手法について検討した。本論文で提案した大規模集積 MMIC による要素回路の物理寸法を削減する方法と、特性を維持しながら回路規模を削減する方法は、通信衛星搭載アンテナを構成するマルチビームフェーズドアレー給電装置の大幅な小形・軽量化に寄与すると考えられる。また、今後の搭載反射鏡の大形化・軽量化技術との相乗効果により、衛星搭載アンテナの大幅な性能向上に大きく貢献することを期待したい。

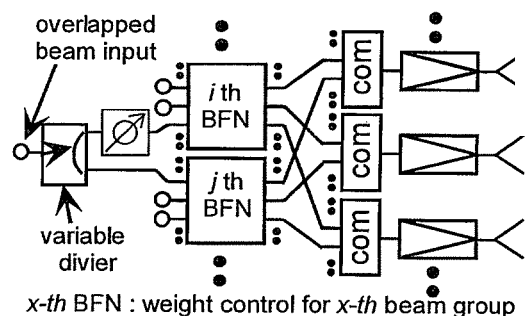


図4 ビーム毎の電力配分を実現するフェーズドアレー給電装置の構成

# 論文審査結果の要旨

航空機・船舶等の移動体や離島に通信サービスを提供するためには、衛星通信システムが不可欠である。また、地上系の通信システムと同等の通信サービスを与えるためには、衛星搭載アンテナ及び給電装置の性能向上と小形・軽量化を両立させる必要がある。本論文は、S帯の衛星搭載用フェーズドアレーアンテナ給電反射鏡アンテナの給電回路について検討を加え、マルチビーム形成回路の小形・軽量化を図った研究成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒言である。

第2章では、ビーム形成装置 (Beam Forming Network: BFN) の構成回路の小形化を図るために、電力分配・合成器、90°ハイブリッド回路、可変減衰回路、及び可変移相回路の小形構成法を提案し、試作によりその動作を確認している。また、小形回路を維持しながら振幅・位相の制御範囲や制御性を改善する方法を提案し、実測によりその有効性を示している。これらの小形回路は、小形 BFN を構成するための回路ライブラリとして有用である。

第3章では、第2章で提案した回路を大規模に集積化することにより、32素子アレーアンテナの電力分配・合成と振幅・位相制御機能を有する BFN-MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) モジュールを開発している。また、回路間の相互干渉及び温度変動の影響を考慮した振幅・位相制御法を提案しており、-10~40°Cの温度範囲で振幅及び位相の誤差がそれぞれ 0.4dB 以下及び 6°以下となることを確認している。

第4章では、第3章で開発した BFN-MMIC モジュールを衛星搭載用アンテナに適用するために、マルチビーム化に適した実装法、軽量化・省電力化のための BFN 及びその制御法について検討している。また、これを技術試験衛星 VIII 搭載用の BFN に適用した結果、同一仕様の BFN に比べて面積、重量及び消費電力を共に半以下に軽減できることを示している。これは優れた成果である。

第5章では、マルチビームの特性を損なうことなく BFN 部の回路規模を大幅に削減できる線形補間ビーム形成方式を提案している。この方式は回路規模を約 30% に低減でき、また、一般のフェーズドアレーアンテナにも適用できる優れた方式である。

第6章では、マルチビームの各ビームに要求される通信容量が時々刻々変化する衛星通信に適した送信系給電装置について検討している。まず、複数の広域エリアを設定し、各広域エリア内の複数のビーム形成に要する励振振幅分布を共通化し、次に、広域エリアを重複させて重複エリアの電力分配の自由度を向上させることにより、素子アンテナの電力増幅器に要求される出力電力のばらつきを低減できることを示している。これは、過大な電力増幅器を不要とする方式であり、給電回路の重量を半以下に削減できる優れた成果である。

第7章は結言である。

以上要するに本論文は、S帯の衛星搭載用フェーズドアレーアンテナ給電反射鏡アンテナの給電回路について検討を加え、マルチビーム形成回路の大幅な小形・軽量化を達成したもので、無線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。