

衛星通信用マイクロ波モジュール及びデバイスに関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、APAA (Active Phased Array Antenna) を搭載した衛星による通信システムに用いるマイクロ波モジュール及びデバイスに関して、回路設計の観点より小型・軽量化および低コスト化の課題に対して筆者が行った研究成果をまとめたものである。

近年においては、携帯電話などの移動体通信の急速な普及に伴い、限られた周波数資源を有効活用することが重要な課題である。そのために多数の加入者の端末にアクセス可能な、衛星を利用したマルチビームによる通信サービスが検討されている。マルチビームを形成するためには、衛星に数十～数千のアンテナ素子とマイクロ波送受信モジュールで構成される APAA を搭載することが必要である。APAA は衛星に搭載できる電源容量の制限や、輸送ロケットで打ち上げられる衛星の重量に制限があるため、APAA を構成するアンテナ素子とマイクロ波送受信モジュールおよびマイクロ波送受信モジュールを構成する低雑音増幅器、高出力増幅器やアンテナのビームを制御するための移相等の小型・軽量化・低消費電力化が重要な課題となる。

1970年の中頃からマイクロ波回路の小型・軽量化を図るために MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) の開発が開始された。MMIC として主に用いられている GaAs は、放射線に対して強いことから、宇宙環境において、高い信頼性があり、衛星搭載用マイクロ波機器に盛んに用いられている。一方、MMIC は高価な GaAs 基板上にトランジスタとともに受動回路素子も形成するためチップサイズの縮小化とともに特性の均一化を図ることで製造コストを低減する必要がある。

従来の APAA 用のマイクロ波受信モジュールでは、アンテナ素子と低雑音増幅器間の多重反射によるリップルの発生を防ぐために従来アイソレータを挿入する必要があり、モジュールが大型化する問題があった。また APAA のビーム制御のために必要な移相器については、従来の多ビット移相器は、主に単ビット移相器を直列接続した構成されるので、ビット数に応じてチップサイズが大型化する問題があった。

これらの MMIC を実装した送受信モジュールは APAA の各アンテナ素子に接続される。APAA ではアンテナ素子数が数千となる可能性もあるため、輸送ロケットに大型展開アンテナを折りたたんで格納することを想定すると、送受信モジュールの小型・軽量・薄型化が必要となる。またアンテナが大型化した場合、各送受信モジュールと衛星本体との信号の伝送において、ケーブルによる損失や重量が増大するので、低損失で軽量の伝送方法が必要となる。

本論文では、まず MMIC 増幅器の低コスト化を図るための設計方針を示した。次にマイクロ波受信モジュールの小型・軽量化のための低反射・低雑音増幅器の設計方法および移相器の回路構成を示した。マイクロ波デバイスを実装するモジュールに関しても小型・軽量・薄型化のための構造と、アンテナが大型化した場合のマイクロ波モジュールと衛星本体間のための軽量・低損失な信号伝送方式を提案した。これらマイクロ波デバイスおよびモジュールを試作し、小型・軽量化・低コスト化に有効であることを示した。

以下、本論文によって得られた結果を各章に分けて要約し、その内容を述べる。

第1章は、序論であり、研究の背景と目的、検討課題について述べると共に本論文の概要について述べる。

第2章は、広帯域設計により回路素子のばらつきを吸収し得る増幅器MMICの設計と、設計精度向上のための素子モデリングについて述べた。14GHz帯中出力増幅器の設計に関して、FET、抵抗などの回路構成要素の不均一性に起因する素子特性の変動を吸収し得る広帯域設計を行い、バイアホールのインダクタンス値を評価し設計精度の向上を図った。その結果、使用周波数帯域14.0～14.5GHzにおいて、直線利得19.4dB以上、入力VSWR1.8以下、出力VSWR2.3以下などのシミュレーションとほぼ一致する良好な特性を得、同時に1dB圧縮点出力も本帯域で20mW以上を実現した。

第3章は、ミリ波低雑音増幅器MMICの小型・低雑音・高利得化のための設計について述べた。ミリ波において、低雑音でかつ高利得で動作するゲート長 $0.15\mu\text{m}$ AlGaAs/InGaAs/GaAs pseudomorphic HEMTを開発し、そのHEMTを用いてV帯およびW帯ミリ波低雑音増幅器の開発を行った。低雑音増幅器の設計において小型・低雑音・高利得化を図るためにHEMTのゲート幅の選定を行い、入出力整合回路は低損失を図るために分布定数回路2素子のみで構成した。その結果、1段増幅器MMIC4チップを用いた4段増幅器で構成したV帯低雑音増幅器モジュールの性能は、51GHzにおいて、雑音指数3.0dB、利得42.2dBであった。また2段増幅器MMIC3チップを用いた6段増幅器で構成したW帯低雑音増幅器モジュールの性能は、91GHzにおいて、雑音指数4.3dB、利得28.1dBであった。

第4章は、多段低雑音増幅器の低反射化のための設計方法について述べている。低雑音でかつ低反射を実現する手法として、ソースインダクタ装荷による低雑音増幅器が提案されている。しかし多段ソースインダクタ装荷低雑音の設計に際して、各段に装荷するソースインダクタ値の決定方法については明確にされていない。ここでは、FETが決められた場合に要求仕様に応じて各段のソースインダクタ値を決定する設計手法を開発し、Ka帯3段低雑音MMIC増幅器の試作を行った。その結果、28GHzで利得19.1dB、入力反射損15.4dB、出力反射損18.5dB、雑音指数1.57dB以下の性能が得られた。

第5章は、複数の移相量を有する移相器の回路構成について述べている。従来の反射型移相器およびローデッドライン型移相器にスイッチを付加し、切り替える2状態の位相量を3状態、4状態に増やした移相器を提案する。この移相器を2個直列接続することで、従来の3ビット移相器と同じ動作を実現できることを示した。上位3ビットに本構成を用いたX帯5ビット移相器を試作し、比帯域10%において、位相量誤差(R. M. S)は10.2、挿入損失8.3dB以下の性能が得られた。

第6章は、小型・軽量・薄型化を図った光マイクロ波受信モジュールについて述べている。マイクロ波モジュールの薄型化を図るためにGrounded CPWを基にしたDCCPW(Double Conductor CPW)線路を提案し、本線路構造がマイクロストリップ線路やコプレーナ線路に比べて主線路と接地導体間に電磁界が閉じ込められることより、パッケージの蓋を主線路に近づけられることを実験あるいは計算結果により検証し、薄型化に有効であることを示した。またモジュールに光・マイクロ波変換機能をもたせ光ファイバによるマイクロ波伝送を採用することにより、アンテナの軽量化、信号伝送の低損失化を実現した。モジュールのサイズは $10 \times 30 \times 1.5\text{mm}^3$ で重量は2gとなり、本モジュールが小型・軽量・薄型化に有効であることが確認できた。

7章は結論であり、本研究成果の全体を要約している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 伊 藤 精 彦

副 査 教 授 小 柴 正 則

副 査 教 授 小 川 恭 孝

副 査 教 授 宮 永 喜 一

学 位 論 文 題 名

衛星通信用マイクロ波モジュール及びデバイスに関する研究

本論文は、APAA (Active Phased Array Antenna) を搭載した衛星通信システムに用いられるマイクロ波モジュール及びデバイスに関して、回路設計の観点より小型・軽量化および低コスト化の課題に対して行われた研究成果をまとめたものである。

携帯電話などの移動体通信の急速な普及に伴い、限られた周波数資源を有効活用することが重要な課題となっている。そのために多数の加入者の端末にアクセス可能な、APAA を搭載した衛星を利用したマルチビームによる通信サービスが検討されている。APAA の開発においては、構成するアンテナ素子とマイクロ波送受信モジュールおよびマイクロ波送受信モジュールを構成する低雑音増幅器、高出力増幅器やアンテナのビームを制御するための移相器等の小型・軽量化・低消費電力化が重要な課題となる。これらの課題を満足するためには、MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) を用いることが有効である。MMIC は高価な GaAs 基板上にトランジスタとともに受動回路素子も形成することにより構成される。したがって、チップサイズの縮小化とともに特性の均一化を図ることにより、製造コストを低減することが重要となる。

本論文では、初めに MMIC 増幅器の低コスト化を図るための設計方針を示した。次に、マイクロ波受信モジュールの小型・軽量化のための低反射・低雑音増幅器の設計方法および移相器の回路構成を示した。次にマイクロ波デバイスを実装するモジュールに関して、小型・軽量・薄型化のための構造を提案した。さらに、アンテナが大型化した場合について、マイクロ波モジュールと衛星本体間のための軽量・低損失な信号伝送方式を提案した。これらマイクロ波デバイスおよびモジュールを試作し、小型・軽量化・低コスト化に有効であることを明らかにした。以下、本論文の構成を示す。

第 1 章は、本論文の背景、意義と位置づけ、本論文全体の構成について述べた。

第2章は、広帯域設計により回路素子のばらつきを吸収し得る増幅器 MMIC の設計と、設計精度向上のための素子モデリングについて提案した。FET、抵抗などの回路構成要素の不均一性に起因する素子特性の変動を吸収し得る広帯域設計を行い、バイアホールのインダクタンス値を評価し設計精度の向上を図ったうえで 14GHz 帯中出力増幅器 MMIC の試作を行い、本設計法の有効性を明らかにした。

第3章では、AlGaAs/InGaAs/GaAs pseudomorphic HEMT を用いたミリ波低雑音増幅器 MMIC の小型・低雑音・高利得化のための設計について示した。低雑音増幅器の設計において小型・低雑音・高利得化を図るために HEMT のゲート幅の選定を行い、入出力整合回路は低損失を図るために分布定数回路 2 素子のみで構成した。その結果、2 段増幅器 MMIC 3 チップを用いた 6 段増幅器で構成した W 帯低雑音増幅器モジュールでは 91GHz において、雑音指数 4.3dB、利得 28.1dB の性能が得られた。

第4章は、ソースインダクタ装荷による多段低雑音増幅器の低反射化のための設計方法について、各段に装荷するソースインダクタ値の決定方法を提案し、Ka 帯 3 段低雑音 MMIC 増幅器の試作を行い、その結果、28 GHz で利得 19.1 dB、入力反射損 15.4 dB、出力反射損 18.5 dB、雑音指数 1.57 dB 以下の性能が得られたことで本設計手法の有効性を確認した。

第5章では、多ビット移相器の小形化に対して、複数の移相量を有する移相器の回路構成を提案した。従来の反射型移相器およびロードドライン型移相器にスイッチを付加し、切り替える 2 状態の位相量を 3 状態、4 状態に増やし、本構成の移相器を 2 個直列接続することで、従来の 3 ビット移相器と同じ動作を実現できることを示した。さらに上位 3 ビットに本構成を用いた X 帯 5 ビット移相器を試作し、本構成により多ビット移相器の小形化が可能であることを示した。

第6章では、大形平面 APAA アンテナのためのモジュール衛星本体間の信号伝送方法として、光ファイバによるマイクロ波伝送を提案し、アンテナの軽量化、信号伝送の低損失化が可能であることを実験で示した。またマイクロ波モジュールの薄型化を図るために、Grounded CPW を基にした DCCPW (Double Conductor CPW) 線路を提案し、本線路構造により、パッケージの蓋を主線路に近づけられることを実験あるいは計算結果により検証し、薄型化に有効であることを示した。

第7章では、本論文の結論を述べ、論文全体の成果を要約した。

これを要するに、著者は、衛星に搭載する APAA 用マイクロ波モジュールおよびデバイスの小形・軽量・低コスト化に有効な回路構成ならびに設計法を確立したものであり、衛星通信工学の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。