

氏名	ひえだ もりしげ 檜枝 護重
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成16年3月10日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成2年3月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程前期課程修了
学位論文題目	ミリ波帯MMIC制御回路に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 水野皓司 東北大学教授 澤谷邦男 東北大学教授 杉浦行

論文内容要旨

本論文は、ミリ波帯MMIC制御回路に関して行った研究をまとめたものである。特に、スイッチの高アイソレーション化、可変減衰器の低位相変化、移相器の小型化、ミクサの高周波数化/低雑音化を実現する手法を明らかにする。以下、本研究の内容の概要を述べる。

第1章では、ミリ波帯MMIC制御回路の高性能化・小型化・高周波数の必要性を述べ、従来のミリ波帯MMIC制御回路に関する研究概要を示し、本研究の意義を明らかにする。近年、情報通信の発達に伴い、衛星を用いた通信・放送、携帯電話、レーダ等の無線システムの用途が広がっている。これに伴い、従来用いられてきたマイクロ波帯およびそれ以下の周波数資源はひっ迫してきている。これを解決し、より早く、より多くの情報を無線で伝えるために、伝送容量の大きいミリ波技術の発展が期待されている。ミリ波は伝送容量が大きい、直進性が高い、大気減衰が大きい等の特徴があり、Ka帯衛星通信、FWA (Fixed Wireless Access)、車載衝突防止レーダ、鉄道などの公共用途、電波天文/地球観測センサ等に用いられているほか、次世代無線LANを狙った研究・開発も行われている。ミリ波帯では、半導体基板上にトランジスタと受動回路とを一体形成したMMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) が用いられる。しかし、MMICは高価なGaAs基板を用いるために、製造コストを低減するには、回路の小型化が必要となる。また、MMICのトランジスタ、受動回路の不均一性に起因して素子特性が変化し、歩留りを劣化させる。コスト低減のためには、回路素子のばらつきを吸収する回路構成や設計法が要求される。ミリ波帯制御回路として、振幅を制御するスイッチ・可変減衰器、位相を制御する移相器、振幅/位相を制御するミクサがある。スイッチ・可変減衰器・移相器は、APAA (Active Phased Array Antenna) 用のアクティブモジュールに用いられる。APAAでは、数十から数千のアンテナ素子と送受信モジュールが使用されるため、モジュールには小型・軽量・低消費電力が要求される。また、低雑音増幅器が得られないサブミリ波に近い周波数帯では、受信機のフロントエンドにミクサが用いられる。とくに、電波天文や地球大気観測などのリモートセンシングでは、非常に高感度な受信機が要求され、超低雑音ミクサが必要となる。ミクサは所望信号以外のイメージ信号なども受信してしまう。イメージ信号を除去するには、ミクサの前段にフィルタを設けることが多いが、サイズが大きい、損失が増加する等の課題がある。そのため、サブミリ波に近い高い周波数に於いても小型・低損失にイメージを除去できるミクサが要求される。

第2章は、キャパシタ装荷シリーズ・シャント形高アイソレーションMMIC SPDTスイッチの構成および設計法について述べる。スイッチは、半導体素子の印加バイアスによるインピーダンス変化を用いて回路を構成する。ミリ波帯では、FETの電極に起因する寄生インダクタンスにより、スイッチのアイソレーション特性は周波数と共に劣化する。そのために、トランジスタの寄生成分による回路特性劣化を防ぎ、低損失で高アイソレーションなスイッチを実現することが要求される。アイソレーシ

オンを高めるためにはスイッチを多段化する手法が知られているが、多段化することにより損失も増加してしまう。損失を増加させること無く、高アイソレーションを得るために、寄生インダクタンスの影響を打ち消すキャパシタを装荷したキャパシタ装荷シリーズ・シャント形高アイソレーション MMIC SPDT スwitchの回路構成を提案する。まず、回路構成および動作原理について述べる。次に、提案する回路構成を30GHz帯で試作した結果を示す。さらに、低損失・高アイソレーションを実現するためのFETのゲート幅設計法を示す。提案する回路構成および設計手法を30GHz帯で試作した結果、アイソレーション28.9dBの良好な特性が得られた。本スイッチ回路構成は、高い周波数でも低損失で高いアイソレーションが得られるために、入力信号レベルの低い車載ミリ波レーダ等のミリ波帯送受信器の切替スイッチに適用可能である。

第3章は、定位相・低損失MMIC可変減衰器の構成および設計法について述べる。アクティブフェーズドアレーアンテナ (Active Phased Array Antenna ; APAA) では、ビーム制御をするために位相を制御する移相器と振幅を制御する可変減衰器を用いる。信号の振幅する可変減衰器には、信号の振幅を制御した際にビーム方向が変化しないために、通過位相が一定である特性が要求される。位相変化の小さい可変減衰器として、スイッチ切替型減衰回路がある。スイッチ切替型減衰回路は、抵抗減衰回路と線路とを2個のSPDT スwitchで切り替えることにより抵抗減衰回路と線路の損失差に相当する減衰量を得るものであり、抵抗減衰回路と線路の電気長を等しくすることにより、位相変化を小さく出来る。しかし、複数のSPDT スwitchと抵抗減衰回路を必要とするので損失が大きく、回路が大きくなってしまふのが難点である。この問題を解決するために、FETを用いた π 型抵抗減衰回路にインダクタを装荷することにより位相変化を低減した小型な可変減衰器の回路構成を提案する。さらに、位相変化の周波数特性から損失を最小にするFETのゲート幅の設計法を示す。まず、回路構成、動作原理について述べ、14GHz帯における動作確認実験の結果を示す。さらに、提案する回路構成を30GHz帯へ適用した結果を示す。提案する回路構成および設計手法を30GHz帯へ適用した結果、最小挿入損失7.9 dB以下、RMS減衰量誤差0.18 dB、RMS通過位相差2.08°の良好な特性が得られた。本技術を用いて開発した30GHz帯5ビット可変減衰器を超高速インターネット衛星WINDS (Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite) のAPAA用アクティブモジュールに適用した。

第4章は、自己切替フィルタを用いた小型MMIC移相器の構成および設計法について述べる。APAAでは、ビーム制御をするために位相を制御する移相器と振幅を制御する可変減衰器を用いる。ビーム制御を高精度に行うためには、位相変化ステップの小さい多ビット移相器が用いられる。多ビット移相器は、単ビット移相器を直列接続して構成されるので、ビット数に応じて回路が大型化し、損失も増大してしまう問題があった。多ビット移相器の小型・低損失化のためには、回路構成の工夫による単ビット回路の小型・低損失化を図る必要がある。また、ミリ波帯ではFETのドレインソース電極間のOFF容量の影響が大きくなり、移相量精度が劣化する。OFF容量の影響を低減するために多段化スイッチを用いると損失が増大してしまう。

この問題を解決するために、FETのOFF容量をフィルタエレメントとして用いた、T型および π 型の2種類のハイパスフィルタ/バンドパスフィルタ切替型移相器回路を提案する。さらに、回路の小型化の評価パラメータとして、移相器回路に用いられているFETのゲート幅の合計値であるトータルゲート幅とインダクタンス値の合計値であるトータルインダクタンスを用いた設計法を提案する。まず、回路構成および動作原理について述べ、12GHz帯での動作確認実験結果を示す。さらに、提案する回路構成を30GHz帯へ適用した結果を示す。提案する回路構成および設計手法を30GHz帯へ適用した結果、チップサイズ3.1mm×1.4mm (4.34mm²)、平均挿入損失7.9dB以下、RMS移相量誤差2.23°以下、RMS振幅偏差0.38dB以下の良好な特性が得られた。本技術を用いて開発した30GHz帯5ビット移相器を超高速インターネット衛星WINDSのAPAA用アクティブモジュールに適用した。

第5章は、270GHz帯MMICイメージリジェクションSISミクサの構成および設計法について述べる。ミリ波帯の中の低雑音増幅器が得られない周波数帯では、受信機にはミクサフロントエンド構成がとられる。ミクサフロントエンドでは、ミクサの雑音特性により受信感度が大きく左右される。また、不要波除去、混信防止のために、イメージ信号の除去が必要となる。ミリ波帯で低損失にミクサのイメージ信号を除去するために、MPI (Martin-Puplet Interferometer) などの干渉計が用いられてきたが、サイズが大きくなってしまふ。この問題を解決するために、マイクロ波帯で用いられているイメージリジェクション回路を270GHz帯SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) ミクサに適用する。

さらに、ミキサの入出力インターフェースである導波管からミキサ回路を構成するコプレーナ線路 (CPW:Co-Planer Waveguide) に変換する導波管/CPW 変換器, イメージリジェクション回路を構成する90 度位相差分配器, SIS 接合のミリ波回路部分を一枚の誘電体基板上に設けたモノリシック回路構成を提案する. まず, 回路構成について述べ, 270GHz 帯でイメージリジェクション回路を実現するための線路方式の選定方法, 分配合成回路の構成方法の設計法を示す. 提案する回路構成および設計手法を適用し270GHz帯で試作した結果, イメージ抑圧比12 dB以上の良好な特性が得られた. 本ミキサ回路構成は, サブミリ波帯に近い周波数に於いても機械的同調を必要とせず, 小型な回路でイメージ信号が除去できるため, 電波天文用受信機, 衛星搭載地球観測センサに適用可能である.

ミリ波帯MMIC制御回路の高アイソレーション化, 低位相変化, 小型化, 高周波数化/低雑音化について行った研究の成果をまとめた. 本研究は, システム性能の向上, ビーム制御精度の向上, 高周波数化, 小型化, 低雑音化が望まれるミリ波帯レーダ・衛星通信・リモートセンシング用制御回路の今後の発展のために有効な研究である.

論文審査結果の要旨及び学力確認結果の要旨

論文提出者氏名	檜枝護重
論文題目	ミリ波帯 MMIC 制御回路の研究
論文審査及び 学力確認担当者	主査 教授 水野皓司 教授 杉浦行 教授 澤谷邦男 教授

論文審査結果の要旨

近年、情報通信の発達に伴い、携帯電話、レーダ、衛星を用いた通信・放送等の無線システムの用途が広がっている。これに伴い、従来用いられてきたマイクロ波帯およびそれ以下の周波数資源はひっ迫してきている。これを解決するために、伝送容量の大きいミリ波帯技術の発展が期待されている。本論文は、ミリ波帯の MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 制御回路に関して行った研究を纏めたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景について述べている。

第2章では、FET を用いた高アイソレーション形 MMIC スイッチの構成および設計法について述べている。ミリ波帯では、寄生インダクタンスにより、アイソレーション特性が劣化する。著者は、この寄生インダクタンスの影響を打ち消すためにキャパシタを装荷したシリーズ・シャント形高アイソレーション MMIC SPDT スイッチの回路構成を提案し、30 GHz 帯で試作して、アイソレーション 28.9 dB の良好な特性を得ている。本スイッチ回路構成は、ミリ波帯でも低損失で高いアイソレーションが得られるために、入力信号レベルの低い車載ミリ波レーダ等の送受信器用切替スイッチ等に適用可能である。

第3章では、定位相・低損失 MMIC 可変減衰器の構成および設計法について述べている。従来のスイッチ切替型減衰器には、損失が大きく、また回路寸法が大きい等の難点があった。この問題を解決するために、著者は FET を用いた π 型抵抗減衰回路にインダクタを装荷し、位相変化の少ないまた小型な可変減衰器の回路構成を提案し、更に損失を最小にする FET ゲート幅の設計法を示している。これらの結果を 30 GHz 帯へ適用した結果、挿入損失 7.9 dB 以下、RMS 減衰量誤差 0.18 dB、RMS 通過位相差 2.08° の良好な特性を得ている。この成果は、超高速インターネット衛星 WINDS のアクティブフェーズドアレーアンテナ (APAA) 用モジュールに適用されている。

第4章では、自己切替フィルタを用いた小型 MMIC 移相器の構成および設計法について述べている。ミリ波帯多ビット移相器を構成するためには、ミリ波帯において低損失の単ビット移相器が必要であるが、著者は FET の OFF 容量をフィルタエレメントとして用いた T 型および π 型の 2 種類のハイパスフィルタ / バンドパスフィルタ切替型移相器回路を提案し、12 GHz 帯でのモデル実験を用いてその設計法を確立した。次いで、その手法を 30 GHz 帯へ適用し、チップサイズ 3.1 mm×1.4 mm (4.34mm²)、平均挿入損失 7.9 dB 以下、RMS 移相量誤差 2.23° 以下、RMS 振幅偏差 0.38 dB 以下などの良好な特性を得ている。本技術を用いて開発した 30 GHz 帯 5 ビット移相器は、超高速インターネット衛星 WINDS の APAA 用モジュールに適用され実用化されている。

第5章では、短ミリ波帯 MMIC イメージリジェクション SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) ミキサの構成および設計法について述べている。ミリ波帯で低雑音増幅器が得られない周波数帯では、受信機にはミキサフロントエンド構成がとられる。著者は、マイクロ波帯で用いられているイメージリジェクション回路を 270 GHz 帯 SIS ミキサに適用し、さらにミキサの入出力インターフェースの導波管 / CPW 変換器、イメージリジェクション回路を構成する 90 度位相差分配器、および SIS 接合のミリ波回路部分を 1 枚の誘電体基板上に設けたモノリシック回路構成を提案、それを 270 GHz 帯に適用しイメージ抑圧比 12 dB 以上の良好な特性を得ている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、ミリ波帯 MMIC 制御回路の高アイソレーション化、低位相変化性、低損失化などについて実用上有効な新たな知見を与えたものであり、電子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。

学力確認結果の要旨

平成15年12月25日、審査委員ならびに関係教官出席のもとに、学力確認のための試問を行った結果、本人は電子工学に関する十分な学力と研究指導能力を有することを確認した。

なお、英学術論文に対する理解力から見て、外国語に対する学力も十分であることを認めた。

論文審査結果の要旨

近年、情報通信の発達に伴い、携帯電話、レーダ、衛星を用いた通信・放送等の無線システムの用途が広がっている。これに伴い、従来用いられてきたマイクロ波帯およびそれ以下の周波数資源はひっ迫してきている。これを解決するために、伝送容量の大きいミリ波帯技術の発展が期待されている。本論文は、ミリ波帯の MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 制御回路に関して行った研究を纏めたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景について述べている。

第2章では、FET を用いた高アイソレーション形 MMIC スイッチの構成および設計法について述べている。ミリ波帯では、寄生インダクタンスにより、アイソレーション特性が劣化する。著者は、この寄生インダクタンスの影響を打ち消すためにキャパシタを装荷したシリーズ・シャント形高アイソレーション MMIC SPDT スイッチの回路構成を提案し、30 GHz 帯で試作して、アイソレーション 28.9 dB の良好な特性を得ている。本スイッチ回路構成は、ミリ波帯でも低損失で高いアイソレーションが得られるために、入力信号レベルの低い車載ミリ波レーダ等の送受信器用切替スイッチ等に適用可能である。

第3章では、定相・低損失 MMIC 可変減衰器の構成および設計法について述べている。従来のスイッチ切替型減衰器には、損失が大きく、また回路寸法が大きい等の難点があった。この問題を解決するために、著者は FET を用いた π 型抵抗減衰回路にインダクタを装荷し、位相変化の少ないまた小型な可変減衰器の回路構成を提案し、更に損失を最小にする FET ゲート幅の設計法を示している。これらの結果を 30 GHz 帯へ適用した結果、挿入損失 7.9 dB 以下、RMS 減衰量誤差 0.18 dB、RMS 通過位相差 2.08° の良好な特性を得ている。この成果は、超高速インターネット衛星 WINDS のアクティブフェーズドアレーアンテナ (APAA) 用モジュールに適用されている。

第4章では、自己切替フィルタを用いた小型 MMIC 移相器の構成および設計法について述べている。ミリ波帯多ビット移相器を構成するためには、ミリ波帯において低損失の単ビット移相器が必要であるが、著者は FET の OFF 容量をフィルタエレメントとして用いた T 型および π 型の 2 種類のハイパスフィルタ / バンドパスフィルタ切替型移相器回路を提案し、12 GHz 帯でのモデル実験を用いてその設計法を確立した。次いで、その手法を 30 GHz 帯へ適用し、チップサイズ 3.1 mm × 1.4 mm (4.34 mm²)、平均挿入損失 7.9 dB 以下、RMS 移相量誤差 2.23° 以下、RMS 振幅偏差 0.38 dB 以下などの良好な特性を得ている。本技術を用いて開発した 30 GHz 帯 5 ビット移相器は、超高速インターネット衛星 WINDS の APAA 用モジュールに適用され実用化されている。

第5章では、短ミリ波帯 MMIC イメージリジェクション SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) ミキサの構成および設計法について述べている。ミリ波帯で低雑音増幅器が得られない周波数帯では、受信機にはミキサフロントエンド構成がとられる。著者は、マイクロ波帯で用いられているイメージリジェクション回路を 270 GHz 帯 SIS ミキサに適用し、さらにミキサの入出力インターフェースの導波管 / CPW 変換器、イメージリジェクション回路を構成する 90 度位相差分配器、および SIS 接合のミリ波回路部分を 1 枚の誘電体基板上に設けたモノリシック回路構成を提案、それを 270 GHz 帯に適用しイメージ抑圧比 12 dB 以上の良好な特性を得ている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、ミリ波帯 MMIC 制御回路の高アイソレーション化、低位相変化性、低損失化などについて実用上有効な新たな知見を与えたものであり、電子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。