

氏名	はん がい まさ たけ 半 谷 政 毅
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成24年3月27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	アクティブフェーズドアレーアンテナ用 マイクロ波制御回路に関する研究
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 尾辻 泰一 東北大学教授 末松 憲治 東北大学准教授 陳 強

論文内容要旨

本論文は、アクティブフェーズドアレーアンテナ(APAA: Active Phased Array Antenna)用マイクロ波制御回路の高性能・高機能・低コスト化を目的として、以下の要素技術について行った研究成果をまとめたものである。

- (1) 高出力送受信(T/R: Transmit/Receive)モジュールを実現するための高耐電力 T/R スイッチ設計技術
- (2) 大規模 APAA 用 T/R モジュールの均一動作を実現するための定位相温度補償減衰器設計技術
- (3) T/R モジュールの低コスト化を実現するための超小形 MMIC 移相器設計技術

第1章では、APAA用マイクロ波制御回路の高性能・高機能・低コスト化の必要性について述べ、従来のマイクロ波制御回路の課題を示し、本研究の意義を明らかにしている。

第2章~第4章は、上記(1)~(3)の設計技術にそれぞれ対応しており、第2章では、Series-Shunt/Shunt 形高耐電力 T/R スイッチの構成および設計法について述べている。従来の T/R スイッチでは、送信時の耐電力を増加させるためには大きなゲート幅の電界効果トランジスタ(FET: Field Effect Transistor)が必要であり、これに伴って受信時の信号リークが増加し挿入損失が増加する問題があることについて述べている。そこで、送信時の高耐電力性能と受信時の低損失性能を両立する T/R スイッチを実現するために、大きなゲート幅の FET を必要としない Series-Shunt/Shunt 形 T/R スイッチ構成を提案している。本回路は、従来の回路における送信端子-アンテナ端子間の FET を4分の1波長線路で置き換えた構成となっており、送信時耐電力が FET の耐圧に主に依存するため、窒化ガリウム(GaN HEMT: Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor)のような高耐圧なデバイスの特長を最大限活かすことが可能である。さらに、提案する回路構成の送信・受信時の電気特性を定式化するとともに、送信時の所望耐電力を満足しつつ受信時の挿入損失を最小化するための FET ゲート幅の設計式を

導出している。提案する設計式に基づいて X 帯で試作を行い、送信時耐電力 20W 以上、受信時挿入損失 1.8dB 以下を実現している。また S 帯で試作したスイッチは送信時耐電力 100W 以上という従来の回路構成では得られない高耐電力特性を得ている。また、さらなる高耐電力化を実現するために、マルチゲート FET を適用する方法についても言及し、その有効性を計算により示している。

第 3 章では、FET 可変 Q 共振器を用いた定位相温度補償減衰器の構成および設計法について述べている。従来の温度補償減衰器では、スイッチング素子の寄生容量の影響により、温度変化に伴って振幅だけでなく通過位相も変化するという問題があることについて述べている。そこで、減衰量が変化しても通過位相が一定な温度補償減衰器を実現するために、動作中心周波数において可変純抵抗として動作する FET 可変 Q 共振器を提案するとともに、これと固定抵抗を組み合わせた可変減衰器を提案している。提案する回路は、FET 可変 Q 共振器と固定抵抗を回路に Series および Shunt に接続した構成であり、温度変化に応じて Series 抵抗および Shunt 抵抗が変化する減衰器として動作することについて述べている。さらに、提案する回路構成について、所望の減衰量特性を得るための設計法を示している。また、提案する可変減衰器を温度補償減衰器として動作させるためのバイアス回路として、FET と同一プロセスで製作可能なダイオード温度センサを備えたバイアス回路の構成と設計法について述べている。X 帯で試作を行い、 $-25^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において減衰量変化 16.9dB を実現しつつ、通過位相の変動が $\pm 5.2\text{deg}$. という従来の回路構成では実現困難な定位相温度補償減衰器を得ている。また、提案する回路のさらなる高機能化の手段として、振幅だけでなく通過位相も補償するための構成法について述べ、その有効性を試作により示している。

第 4 章では、All-Pass 回路を用いた超小形モノリシックマイクロ波集積回路(MMIC : Monolithic Microwave Integrated Circuit)移相器の構成および設計法について述べている。従来の MMIC 移相器は高域通過回路(HPF: High Pass Filter)と低域通過回路(LPF : Low Pass Filter)をスイッチで切り替えるものであり、HPF を動作させるための大きな集中定数素子とスイッチのサイズにより小形化が困難であり、特にこの影響は低い周波数で顕著であることについて述べている。そこで、S 帯や C 帯といった低い周波数帯で小形な MMIC 移相器を実現するために、サイズの小さい集中定数素子で大きな移相量が得られる全域通過回路(All-Pass 回路)を用いた移相器の構成を提案している。提案する回路は FET とキャパシタおよびインダクタを組み合わせる構成され、FET のオン/オフ動作に応じて回路の状態が All-Pass 回路または帯域通過回路(BPF : Band Pass Filter)に切り替わり、両者の通過位相差を移相器の移相量として得る動作をすることについて述べている。さらに、提案した回路構成の電気特性を定式化し、所望の反射特性および移相量を実現しながら、基準・移相状態での等振幅特性と平坦な周波数特性を得るための設計式を導出している。また、提案する回路の遷移周波数と従来の回路のカットオフ周波数および両者に用いられる集中定数素子値の比較を通して、提案する回路が MMIC 移相器の小形化に極めて有効

であることを示している。S帯およびC帯で試作を行い、良好な電気性能を実現しつつ、チップサイズが 1.63mm^2 および 1.37mm^2 という極めて小形なMMIC移相器を得ている。また、さらなる小形化の手段として、提案する回路の不要共振を回避するための構成法について述べ、この有効性を計算により示している。

第5章の結論では、年代毎のT/Rモジュールの出力電力の傾向を調査した結果を示し、今後もT/Rモジュールの高出力化が図られることについて述べている。これに伴って、本論文で述べた技術課題である高耐電力T/Rスイッチの設計技術、定位相温度補償減衰器の設計技術および超小形MMIC移相器の設計技術の必要性が今後も高まっていくことについて述べている。以上のように、本論文ではAPAA用マイクロ波制御回路の高性能・高機能・低コスト化を目的とし、これを実現するために必要な要素技術についての研究成果をまとめたものである。APAAはレーダ、通信、リモートセンシング等に応用されており、今後も様々なアプリケーションへの適用が期待されていることから本研究成果がこれらのアプリケーションの今後の発展に有効であることについて述べている。

論文審査結果の要旨

アクティブフェーズドアレーアンテナ (APAA) は全ての素子アンテナに送受信モジュールを設け、送受信信号の振幅・位相を制御して指向性ビームを走査するアンテナであり、高速・高精度でビーム走査できること、高出力送信と低雑音受信が可能であることから、レーダのみならず通信やリモートセンシングの分野に応用されている。このアンテナの性能向上のためには、送受信モジュールの高出力化と性能の均一化及び低コスト化が望まれている。著者は送受信モジュールの性能向上のために、送受切換スイッチ (T/R スイッチ) の高耐電力化・低損失化、電力増幅器の温度特性を補償する減衰器の高性能化、MMIC 移相器の小形化に関する研究を行ってきた。本論文はその成果をまとめたもので、全編 5 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では T/R スイッチの高耐電力化と低損失化について述べている。従来用いられてきた T/R スイッチは、耐電力を高くすると損失が増大するという問題があった。そこで、T/R スイッチを構成する 4 つの FET の内 1 つを 4 分の 1 波長伝送線路で置き換えることにより高耐電力化と低損失化を同時に満たす Series-Shunt/Shunt 形 T/R スイッチを提案し、その設計法を示している。7~12 GHz において試作・評価した結果、挿入損失を 1.8 dB 以下に維持しつつ耐電力 20 W 以上を達成しており、この回路構成が有効であることを示している。

第 3 章では電力増幅器の温度特性を補償する減衰器の高性能化について論じている。高出力の電力増幅器は温度特性を有しており、APAA においては温度の不均一に伴って多数の電力増幅器の利得にばらつきが発生し、放射特性が劣化するという問題が生じるため、利得の温度特性を補償する減衰器が不可欠であり、振幅のみを補償し、位相特性は不変であることが要求される。そこで、FET とインダクタを組合せた可変 Q 共振器が可変抵抗として動作することを利用し、この共振器と固定抵抗、及びダイオードを用いたバイアス回路を組合せた温度補償減衰器を提案している。この回路を X 帯で設計・試作・評価した結果、-25~+50 °C の温度範囲で 16.9 dB の減衰量変化と $\pm 5.2^\circ$ の定位相特性が得られることを確認している。この成果は APAA のビーム走査の高精度化に大きく貢献するもので、高く評価される。

第 4 章では APAA の低コスト化のために MMIC 移相器の小形化について検討した結果を述べている。従来の MMIC 移相器は高域通過フィルタと低域通過フィルタをスイッチで切換えるもので大形であった。そこで、スイッチと高域通過フィルタを用いない移相器として全域通過フィルタを用いた移相器を提案している。この移相器の基準状態と移相状態の損失を等しくし、広帯域動作させるための設計法を示すと共に、C 帯における試作により 1.37 mm² の小形 MMIC 移相器を実現している。移相器の小形化は低コスト化に繋がるものであり、工学的に優れた成果である。

第 5 章は結論である。

以上要する本論文は、APAA の高性能化のために送受信モジュールを構成する T/R スイッチの高耐電力化・低損失化、増幅器の温度特性を補償する減衰器の高性能化、MMIC 移相器の小形化についてそれぞれの回路構成を提案し、その有効性を示したもので、マイクロ波工学及び電気・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。