

学 位 論 文 題 名

準光学アンテナ・ミキサに関する基礎研究

学位論文内容の要旨

本論文は、新しい構造を持つ準光学アンテナ・ミキサを考案し、その設計法、特性評価について電磁界シミュレータによって解析し、試作・実験を行って明らかにした研究成果についてまとめたものである。さらに、提案した準光学アンテナ・ミキサ素子を複数配列することで導かれた新しいビーム走査法について、数値計算によりその動作原理を明らかにし、試作、実験を行った研究成果についてもまとめた。

ミリ波帯は、最近再び注目されている周波数帯である。これは、急速な情報通信技術の進歩と情報通信手段の需要の増加により、ミリ波帯以外の周波数帯で利用できる周波数資源がほとんど飽和状態にあることに加えて、ミリ波特有の性質を積極的に活用しようという動きが高まってきたことに起因する。さらに、MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 技術や半導体デバイスの開発が進んで、ミリ波帯システムの実用化に対する制限はほとんど克服されつつある。このような流れを受けて、単なる“回路”技術にとどまらず、光学的要素を取り込んだ、いわゆる準光学技術が確立してきた。中でも、準光学アンテナ・ミキサは、高周波信号（以下RFとする）と局部発振周波（以下LOとする）を自由空間においてミキサへ直接入力し、直後に中間周波数（以下IFとする）へ変換することのできるサブシステムとしてミリ波帯システムの実用化の重要な位置を占めている。準光学アンテナ・ミキサの利点は、RFとLOを伝送する線路が事実上存在しないので、ミリ波帯の実用化において大きな問題の一つである損失を取り除くことができる点にある。しかしながら、従来提案されてきた準光学アンテナ・ミキサのほとんどは、RFとLOをアンテナに対して同じ方向から入力しなくてはならず、そのためにダイプレクサを必要とするなどシステムの構造が複雑であり、設計の自由度がきわめて低いものであった。

本論文では、コプレーナ導波路給電による2周波マイクロストリップアンテナという新しい構造を持つアンテナ素子に着目し、ミリ波帯での設計法およびその諸特性について電磁界シミュレータを用いて明らかにした。その結果、コプレーナ導波路の特徴を生かした、2周波動作が可能であるアンテナを開発することに成功した。さらに、このアンテナにミキサダイオードを組み込むことで、準光学アンテナ・ミキサが構成できる。ここで提案された準光学アンテナ・ミキサは、基板のそれぞれの面でRFとLOを別々に入力するため、従来の準光学アンテナ・ミキサでは必須であったダイプレクサが不要になった。これらの結果に対して、マイクロ波帯スケールリングモデルを用いて試作実験し、良好な動作を確認した。

つぎに、この準光学アンテナ・ミキサのRFとLOを基板の両面で別々に入力するという特徴から、まったく新しいビーム走査が可能であることを導いた。この新しいビーム走査では、複数の準光学アンテナ・ミキサ素子を配列し、LOの入射角や周波数を変化させることで、RFの最大到来方向の走査が可能となる。従来ビーム走査は、一般にフェイズドアレイを用いて行われてきたが、本研究で提案するビーム走査法では移相器などのRF回路は一切存在せず、非常に単純な構造で構成されてい

る。そのため、RF損失は存在せず、多様なシステムで利用できる。論文中では、その動作原理について、具体的なモデルを用いた数値計算によって明らかにし、さらに、4素子の準光学アンテナ・ミキサを直線状に配列した試作モデルによって実証実験を行った。その結果、計算どおりビーム走査が可能であることが明らかとなった。

論文の後半では、この多素子配列準光学アンテナ・ミキサに対して、ミリ波での製作、高温超伝導体ジョセフソン接合（以下HTS-JJ）の適用についても触れた。さらに、素子数などの変化について検討し、パラメータの最適化をはかった。

以下、本論文によって得られた結果および考察を各章に分けて要約し、その意義を述べる。

第1章では、本論文の中心的テーマであるミリ波帯および準光学アンテナ・ミキサの歴史的背景、ならびに論文の概要を述べた。

第2章では、準光学アンテナ・ミキサを実現するため、コプレーナ導波路給電による2周波マイクロストリップアンテナを提案し、ミリ波帯においての設計と数値解析を行った。その結果、提案したモデルは、比較的容易にRF、LOの両パッチと整合がとれ、RFとLOの共振周波数をRFの8%以上離すことによって、異なる2つの周波数を基板の各面で独立して、かつ同時に動作可能であることが明らかとなった。これは、準光学アンテナ・ミキサを実現するうえで、有利な特性である。

また、周波数が20分の1となるマイクロ波帯でスケールモデルを試作し、解析および実験を行った。これにより、2つの周波数(RFとLO)を基板の表裏でそれぞれ独立に受信可能であることが確認できた。

さらに、試作モデルのコプレーナ導波路の終端部分にミキサダイオードを装荷し、ミキシング動作を確認した。線路損失を取り除いた後での変換利得は、約 -10dB であった。故に、ミキサダイオードの後段にローパスフィルタを組み込むことで、準光学アンテナ・ミキサが実現可能である。

第3章では、多素子の準光学アンテナ・ミキサを直線状に配列した新しいビーム走査法を提案し、その動作原理について解説した。LOの入射角または周波数(場合によっては両方)を操作することで、移相器などの高周波回路を用いることなくRFの到来方向を走査できることが導かれた。

さらに、マイクロ波帯で4素子の準光学アンテナ・ミキサを用いたモデルを試作し、実験を行った。実験結果は、計算結果とほぼ一致し、LOの入射角を操作することで、RFの到来方向を走査できることが確認できた。

第4章では、ミリ波帯でのMMIC化モデルの製作に向けて必要な検討事項を挙げて、具体例を検討した。ミキサダイオードとして、ショットキバリアダイオードやHTS-JJを適用した場合のMMIC基板の製造工程を示し、その実現可能性を示した。また、コプレーナ導波路を含む導体面の構造を示し、整合とフィルタリングについて議論した。そして、ミキサダイオードを低温で駆動するための測定環境として、本論文で提案する準光学アンテナ・ミキサに適したクライオスタットを考案し、具体例を挙げて検討した。

第5章では、素子数、LOの入射角、RFとLOの周波数比をそれぞれ変化させたときの出力特性を考察し、ビーム走査がもっとも効果的に行われるときのパラメータ値を決定した。このとき検討した出力特性は、ビーム幅、利得変動およびビーム走査角である。この結果、LOの入射角がエンドファイア側に近いときよりも、ブロードサイド側に近いほうが、ビーム幅と利得変動については特性が良く、ビーム走査角についてはその逆であることが示された。したがって、最適なパラメータ値はLOの入射角がエンドファイア側とブロードサイド側の中間にあるときがもっとも効果的である。

第6章は結論を述べ、論文全体の成果を要約した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 伊 藤 精 彦

副 査 教 授 宮 永 喜 一

副 査 教 授 小 柴 正 則

副 査 教 授 小 川 恭 孝

学 位 論 文 題 名

準光学アンテナ・ミキサに関する基礎研究

本論文は、新しい構造を持つ準光学アンテナ・ミキサを考案し、その設計法、特性評価について電磁界シミュレータによって解析し、試作・実験を行って明らかにした研究成果についてまとめたものである。さらに、提案した準光学アンテナ・ミキサ素子を複数配列することで導かれた新しいビーム走査法について、数値計算によりその動作原理を明らかにし、試作、実験を行った研究成果についてもまとめた。

ミリ波帯は、最近再び注目されている周波数帯である。これは、急速な情報通信技術の進歩と情報通信手段の需要の増加により、ミリ波帯以外の周波数帯で利用できる周波数資源がほとんど飽和状態にあることに加えて、ミリ波特有の性質を積極的に活用しようという動きが高まってきたことに起因する。さらに、MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 技術や半導体デバイスの開発が進んで、ミリ波帯システムの実用化に対する制限はほとんど克服されつつある。このような流れを受けて、単なる“回路”技術にとどまらず、光学的要素を取り込んだ、いわゆる準光学技術が確立してきた。中でも、準光学アンテナ・ミキサは、高周波信号(以下RFとする)と局部発振周波(以下LOとする)を自由空間においてミキサへ直接入力し、直後に中間周波数(以下IFとする)へ変換することのできるサブシステムとしてミリ波帯システムの実用化の重要な位置を占めている。準光学アンテナ・ミキサの利点は、RFとLOを伝送する線路が事実上存在しないので、ミリ波帯の実用化において大きな問題の一つである損失を取り除くことができる点にある。しかしながら、従来提案されてきた準光学アンテナ・ミキサのほとんどは、RFとLOをアンテナに対して同じ方向から入力しなくてはならず、そのためにダイプレクサを必要とするなどシステムの構造が複雑であり、設計の自由度がきわめて低いものであった。

本論文では、コプレーナ導波路給電による2周波マイクロストリップアンテナという新しい構造を持つアンテナ素子に着目し、ミリ波帯での設計法およびその諸特性について電磁界シミュレータを用いて明らかにした。その結果、コプレーナ導波路の特徴を生かした、2周波動作が可能

であるアンテナを開発することに成功した。さらに、このアンテナにミキサダイオードを組み込むことで、準光学アンテナ・ミキサが構成できる。ここで提案された準光学アンテナ・ミキサは、基板のそれぞれの面でRFとLOを別々に入力するため、従来の準光学アンテナ・ミキサでは必須であったダイプレクサが不要になった。これらの結果に対して、マイクロ波帯スケーリングモデルを用いて試作実験し、良好な動作を確認した。

つぎに、この準光学アンテナ・ミキサのRFとLOを基板の両面で別々に入力するという特徴から、まったく新しいビーム走査が可能であることを導いた。この新しいビーム走査では、複数の準光学アンテナ・ミキサ素子を配列し、LOの入射角や周波数を変化させることで、RFの最大到来方向の走査が可能となる。従来ビーム走査は、一般にフェイズドアレイを用いて行われてきたが、本研究で提案するビーム走査法では移相器などのRF回路は一切存在せず、非常に単純な構造で構成されている。そのため、RF損失は存在せず、多様なシステムで利用できる。論文の中では、その動作原理について、具体的なモデルを用いた数値計算によって明らかにし、さらに、4素子の準光学アンテナ・ミキサを直線状に配列した試作モデルによって実証実験を行った。その結果、計算どおりビーム走査が可能であることが明らかとなった。

論文の後半では、この多素子配列準光学アンテナ・ミキサに対して、ミリ波での製作、高温超伝導体ジョセフソン接合の適用についても触れた。さらに、素子数などの変化について検討し、パラメータの最適化をはかった。

本論文の成果として、準光学アンテナ・ミキサの新しい構造を示し、また、これを利用したビーム走査に関する原理を明らかにすることができた。さらに、解析および実験によって良好な特性が得られることを確認した。

これを要するに、著者は、新しい準光学アンテナ・ミキサ素子に関する詳細な考察およびこれらを複数個用いた多素子配列準光学アンテナ・ミキサによる新ビーム走査法に関する有益な知見を得たものであり、アンテナ工学およびミリ波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。