

氏名	やまぐち さとし 山口 聡
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成25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) 通信工学専攻
学位論文題目	ミリ波帯スロットアレーアンテナの高性能化に関する研究
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 安達 文幸 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、ミリ波アプリケーション向けスロットアレーアンテナについて、その高性能化について行った研究成果をまとめたものである。

第1章では、ミリ波のアプリケーションとミリ波帯のアンテナの概要を説明し、その中で機構的、電気的な側面で性能に優れているものとして導波管スロットアレーアンテナを挙げている。本アンテナを偏波の観点から以下の3つに分類し、それぞれの課題を述べている(カッコ内は本論文との対応)。

(1) 斜め偏波 (2, 3章)

アプリケーションが少ないため、検討例が少ない。

(2) 管軸偏波 (4章)

インピーダンス整合が困難であること、中空導波管ではグレーティングローブを発生することといった理由により、実用例は限定的。

(3) 管幅偏波 (5章)

設計法は確立されており、製品への適用実績も多い。今後はさらなる高機能化が求められる。

第2章では、斜め偏波を実現するアンテナ方式として導波管コンパウンドスロットアレーアンテナを挙げ、等価回路を用いた設計法について述べている。従来、コンパウンド型スロットは主に多段導波管の結合スロットとして用いられており、アンテナとしての応用例は少なく、アレーアンテナの設計法が確立されていない問題があった。はじめに導波管コンパウンドスロット素子アンテナの特性を示し、本アンテナは非対称T型等価回路で表されることを説明している。そして、非対称T型等価回路のシリーズ成分がリアクタンスを持つことから、本アンテナをアレー化した場合に各スロットを同相で励振することが課題となることを明らかにしている。次に、等

価回路を用いたアレーアンテナの設計法を提案し、スロット長とオフセット量を適切に組み合わせるだけで、所望の励振分布、および入力インピーダンスを実現できることを示している。最後に、給電回路と組み合わせてモデルアレーの試作評価を行い、良好な特性が得られることを確認し、提案した設計法の有効性を示している。

第3章では、前章の導波管コンパウンドスロットアレーアンテナに代わる新たな斜め偏波スロットアレーアンテナの方式として、中空方形同軸線路スロットアレーアンテナを提案している。本アンテナでは、放射部の線路構造として導波管に代わり同軸線路を用いることにより、線路幅を $0.4\lambda_0$ 程度まで小型化して用いることができるため、本アンテナを複数個配列してアレーアンテナを構築した場合、広角まで電氣的にビーム走査を行うことができるようになる。また、同軸線路内導体部に設けた波長短縮構造によって管軸方向ではスロットを約 $0.9\lambda_0$ 間隔でグレーティングローブを発生しないように配列できることを示している。放射スロット、放射スロット間および同軸線路先端短絡部の線路内波長短縮構造、導波管/同軸線路変換器といったアンテナの各構成要素について等価回路を用いた設計法を説明している。最後に、アンテナの試作評価により良好な結果が得られることを確認し、提案構造の有効性を示している。

第4章では、管軸偏波を実現するアンテナ方式として導波管シリーズスロットアレーアンテナを挙げ、所望の特性を得るためのアンテナ構成法を提案している。従来のシリーズスロットは、基本的にスロット長しかパラメータが無いので、共振特性は得られても、放射量をスロット形状のみで制御することは困難であるという課題があった。そこで、スロットの前面に導体のスペーサを設け、その先にポスト壁キャビティ付誘電体スラブを装荷する構造を提案し、シリーズスロットのインピーダンスを調整できることを示している。これにより給電点での整合を図ることができるようになり、アンテナの広帯域化を実現している。さらに導体スペーサおよびポスト壁キャビティ構造によってスロットのビームを絞り、アンテナ正面方向の利得を向上できることを示している。また、中空導波管を用いた場合でもスロットを λ_0 以下の間隔で配列するために、導波管の幅広面に山形状に並べたポスト列から成る導波管の管内波長短縮構造を提案している。最後に、ミリ波帯でアンテナ試作し、提案構造の有効性を確認している。

第5章では、管幅偏波アンテナの高機能化を図るため、ビームチルト型ポスト壁導波管シャントスロットアレーアンテナを提案している。従来のポスト壁導波管シャントスロットアレーアンテナは主ビーム方向をアンテナの正面、あるいは進行波励振型設計により管軸方向にチルトしたものがほとんどであるといった課題がある。そこで、管幅方向の任意の方向へ主ビームをチルトしたアンテナの構成法を提案している。主ビームのチルトは複数列のポスト壁導波管に所定の位相差を与えて給電することで実現するが、ミリ波帯では誘電体損などの基板材料の損失が無視できないので、アンテナの構造をできるだけ簡略化する必要がある。そこで、励振位相が周期的

に繰り返す様にポスト壁導波管の間隔を選定することにより、必要な位相調整回路の数を削減し、アンテナ構造の簡素化および低損失化が図れることを示している。60GHzにおいてアンテナを試作し、低反射特性と良好な放射効率を実現し、提案したアンテナ方式の有効性を確認している。また、本アンテナをサブアレーとした基地局装置（AP）を用いて複数の端末との無線通信試験を行っており、1AP-1 端末間通信時の最大実効レート 739Mbps、2AP-4 端末間同時通信時の合計実効レート 583Mbps(1 端末当り 146Mbps)となる試験結果を得て、ミリ波を用いた高速無線通信を実証している。

第6章の結論では、各章で得られた研究成果をまとめている。ミリ波を利用したアプリケーションはますます増加の一途を辿り、アンテナにはさまざまな偏波に対応できること、広角まで電子的にビーム走査を行うことができること、広帯域であることなどの高性能化が要求されると考えられるため、本研究の成果が今後のミリ波分野の発展に寄与することについて述べている。

論文審査結果の要旨

ミリ波を利用した無線通信やセンシングは広い周波数帯を利用でき、アンテナを含む装置の小型化・軽量化が可能であるなどの利点を有している反面、伝搬損失とアンテナ・回路における損失が大きいことなどが欠点となっている。ミリ波帯で低損失の薄型アンテナとして導波管スロットが優れていることは知られているが、グレーティングローブ (GL) の抑圧やインピーダンス整合など多くの課題が残されている。著者は導波管の管軸に対して平行、垂直及び 45° 傾いた偏波を有する導波管スロットアレーアンテナについてその設計法を示すと共に、高性能化を達成した。本論文は、その成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、77 GHz帯車載レーダに用いるアンテナとして、給電用導波管の管軸に対して 45° 傾いた偏波を有するコンパウンドスロットアレーアンテナを提案し、その設計法について述べている。まず、このアレー素子を非対称T型等価回路で表わされることを示し、次にこの等価回路を用いてアレーアンテナを設計し、スロット長及びスロットの導波管中心線からのオフセット量を適切に組み合わせるだけで所望の励振分布及び入力インピーダンスを実現できることを示している。さらに、このアレーアンテナを試作し、設計の有効性を示している。このアンテナは実用化されており、工学的に有用である。

第3章では、第2章のアレーアンテナに代わる斜め偏波スロットアレーアンテナとして、 45° 偏波方形同軸線路スロットアレーアンテナを提案している。同軸線路を用いることにより線路幅を0.4波長程度まで短縮することができるので、本アンテナを配列したアレーアンテナではGLを発生させることなく水平面内で広角までビーム走査を行うことができる。また、同軸線路内導体部に設けた波長短縮構造によってスロットを管軸方向に約0.9波長間隔で配置できるので、垂直面内でもGLを発生しない。等価回路を用いた設計法について述べると共に、試作評価により所望の特性が得られることを確認し、提案構造の有効性を示しており、優れた成果である。

第4章では、管軸方向の偏波アンテナとして導波管シリーズスロットアレーアンテナの構成法を提案している。まず、スロットの前面に導体のスペーサを設け、その先にポスト壁キャビティ付誘電体スラブを装荷する構造により、広帯域にわたってインピーダンス整合できることを示している。また、導体スペーサ及びポスト壁キャビティ構造によって正面方向の利得を向上できること、導波管の幅広面に山形状に並べたポスト列を設けることにより、スロットを0.95波長以下の間隔で配列できるのでGLが発生しないことを数値計算と実験により明らかにしている。これらの成果は従来の導波管シリーズスロットアレーアンテナの課題を克服するもので高く評価できる。

第5章では、管幅方向の偏波を有するアンテナとしてビームチルト型ポスト壁導波管シャントスロットアレーアンテナを提案している。また、励振位相が周期的に繰り返す様にポスト壁導波管の間隔を選定することにより位相調整回路の数を削減し低損失化を達成している。このアンテナでは管幅方向へビームをチルトすることができるので、これをサブアレーとして60 GHz帯室内無線LANの基地局に応用し、約600 Mbpsの高速無線通信が可能であることを確認している。これは実用上重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、導波管の管軸に対して3種類の偏波を有するミリ波帯導波管スロットアレーアンテナの設計法を提案すると共に、これを用いてその高性能化を達成したもので、通信工学並びに無線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。