

氏名	いわさき とおる 岩崎 徹
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成23年3月25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	漏れ波導波路を用いたミリ波アンテナのビーム制御技術に関する研究
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

通信や放送を問わず、多くの場面で様々な周波数帯の電波が利用されており、電波は欠かすことができないものとなっている。近年はブロードバンド伝送に対する需要がますます増大し、周波数の確保および電波の広帯域性という観点から、ミリ波帯電波が有望視されている。放送分野においては、直接視聴者へ送る放送波としての電波と放送番組の制作現場において番組素材を伝送する手段としての電波に大別できる。特に後者においてハイビジョン信号を伝送するとき、高画質化や伝送遅延の短縮のために低圧縮(約 160Mbps)あるいは非圧縮(約 1.5Gbps)のハイビジョン信号を用いるので、伝送信号は高ビットレートとなる。このため、ミリ波帯電波を用いた無線伝送技術が積極的に活用されている。

一方、その他のミリ波帯電波の応用として、ミリ波イメージングが挙げられる。ミリ波イメージングとは可視光の代わりにミリ波帯電波を用いて物体を撮影する技術である。可視光はほとんどの物質の表面で反射、散乱されるため、遮蔽物に隠れた物体を撮影することができないが、ミリ波帯電波は可視光に比べて波長が長く、反射や散乱による影響を受けにくいので、光を遮る遮蔽物も透過する。このようなミリ波帯電波の性質を利用すれば、遮蔽物に隠れて見えない物体を撮影することができる。近年、安全で安心な社会に対する関心が高まる中、例えば空港でのセキュリティ対策用に、ミリ波イメージング技術の研究・開発が活発になってきている。放送分野においても、災害や事故現場などでの緊急報道用カメラとして、霧や煙など遮蔽物の向こうの様子などを撮影するアクティブ方式のミリ波イメージングシステムの研究・開発が進められている。

ハイビジョン信号を無線で伝送する際、様々な無線環境下でもその環境の変化に応じて電波が途切れることなく安定に伝送できるようにする必要がある。一方、ミリ波イメージング技術においては、通常のテレビカメラと同様に被写体を撮影するためには、アンテナのビームを2次元的にかつ高速に走査する技術が必要である。いずれにおいてもミリ波アンテナのビーム制御技術が重要な要素技術となる。

ビーム制御可能なアンテナとして、アレーを構成する各素子の励振位相を移相器により制御することによりビ

ームを走査するフェーズドアレーアンテナなどがこれまでに実現されているが、移相器などのアクティブ素子が必要であること、また、アンテナ素子と導波管などの給電系を個別に製作することが必要となることなどから、構成が複雑となり、特にミリ波帯で製造コストが上昇するという問題がある。このようなことから、導波路そのものを用いてその端部から電波を放射させたり、あるいは周期構造などで導波路に摂動を与えて電波を放射させる簡単な構成のアンテナがミリ波帯では有効となる。

本論文では、放送分野に応用するためのミリ波アンテナのビーム制御技術の簡易化・高性能化の研究の一環として、漏れ波導波路を用いて、放送番組の制作現場における運用の形態（対向するアンテナの設置方向）に応じてビームを容易に切り換えることが可能なミリ波アンテナ及びミリ波アクティブイメージングシステムへの適用を目的とした周波数走査アンテナについて検討した結果をまとめたものであり、全編6章より構成されている。

第1章は緒言である。本研究の背景と目的について述べるとともに、従来のビーム制御技術に関する研究について概説し、その課題を明らかにしている。

第2章から第3章まではミリ波帯電波を利用した放送番組素材伝送技術に用いるためのビーム切換アンテナについて述べている。

第2章では、可動周期金属板付きイメージガイドから構成される漏れ波アンテナ（漏れ波導波路）及び表面波アンテナを用いて、これらのアンテナのビーム方向の違いを利用することによりエンドファイア方向とブロードサイド方向の2方向にビームを簡易に切り換えることが可能なアンテナの構造を提案している。しかし、アンテナの長さに制約がある場合、漏れ波アンテナの動作のときに漏れ波導波路の電力の一部は導波路端部から放射するため、エンドファイア方向にサイドローブが発生し、主ビームの利得が低下するという問題があった。そこで、漏れ波アンテナの動作に切り換えたときに、周期金属板の先端に地板面に対して45度傾けた反射板を設置することにより、エンドファイア方向に発生するサイドローブと主ビームの利得の低下を抑えることが可能な構造の検討を行っている。アンテナの放射特性を評価することにより、エンドファイア方向とブロードサイド方向の2方向にビームを切り換えられることを確認するとともに、反射板を設置することにより、エンドファイア方向のサイドローブの低減と主ビームの高利得化を達成できることを明らかにしている。

第3章では、放送番組の制作現場において使用されているハイビジョンワイヤレスカメラへの適用を目的として、第2章で提案したビームの切り換え方法を基に、ハイビジョンワイヤレスカメラの運用形態を考慮したビーム切換アンテナについて検討している。ハイビジョンワイヤレスカメラに適用される送信アンテナには、屋内（スタジオ）や屋外など運用する環境に応じて指向性を切り換えられることが求められる。例えば、屋内で使用する場合は、受信アンテナは送受信間の見通しを確保するため天井面に設置され、屋外の場合は通常、地上2～3mの高さに設置される。また、ハイビジョンワイヤレスカメラが移動あるいは回転する場合でも安定した無線伝送を実現するためには、送信アンテナの放射パターンとしては、垂直軸に対して回転対称なビームが適している。

そこで、送信アンテナとして、上方向にチルトしたコニカルビームと、水平面での全方向性のビームに切り換えられる周期金属リング付き円筒形誘電体線路を用いたビーム切換アンテナを提案している。アンテナを試作し放射特性を評価することにより、回転対称なコニカルビームと全方向性ビームに良好に切り換えられることを示している。

第4章から第5章まではミリ波アクティブイメージングシステムに用いる周波数走査アンテナについて述べている。本アクティブイメージングシステムは、送信アンテナから広帯域ミリ波信号（擬似雑音信号）を被写体に向けて放射し被写体で反射された信号を、周波数によって受信ビームの方向が異なる指向性を持つ周波数走査アンテナで受信することにより、帯域内の各周波数に対応した複数の受信ビームを同時に形成することが可能となり、1次元方向に各画素の電力（画素情報）を同時に取得することができることを特徴としている。また、周波数走査アンテナのビーム走査方向を垂直方向とし、水平方向については受信アンテナを機械的に駆動させて、各受信ビーム方向からの反射波の電力を検出して、2次元の画像を得る。したがって、水平方向と垂直方向の両方を機械走査する場合に比べてフレーム周期（1枚の画像を走査するのに必要な時間）を短縮することが可能となる。本システムにおいて、通常のカメラと同等の画角を得るためには、与えられた周波数帯域で周波数走査アンテナのビーム走査範囲ができるだけ大きくなるように設計する必要がある。また、本システムの角度分解能はアンテナのビーム幅、即ち開口の大きさで決定されたため、被写体の形を認識できるような角度分解能とするためには、ビーム幅を約 $1^\circ$ 以下即ち使用する電波の波長の約50倍以上の長さをもつ大型の周波数走査アンテナが必要となる。

第4章では、ミリ波アクティブイメージングシステムへの適用を目的として、構造が簡単でかつミリ波帯で低損失な導波路として知られているNRDガイドを用いて、使用する電波の波長の約90倍以上の長さをもつ大型な60GHz帯周波数走査アンテナについて検討している。使用周波数帯域をNRDガイドの周波数分散が大きい遮断周波数近傍となるように設計し、試作と評価を行った結果、設計どおりのビーム走査範囲及びビーム幅が得られることを示している。また、試作した周波数走査アンテナをミリ波アクティブイメージングシステムに適用して撮影実験を行うことにより、約40秒のフレーム周期で被写体を認識できる程度に撮影できることを確認するとともに、NRDガイドを用いた周波数走査アンテナがミリ波イメージングシステムに適用可能であることを明らかにしている。

第5章では、周波数走査アンテナのビーム走査範囲の拡大について検討している。第4章で検討したNRDガイドのような通常の導波路を用いる場合、限られた周波数帯域では導波路の規格化位相定数を大きく変化させることができないため、ビーム走査範囲は限定されるという課題がある。そこで、メタマテリアル技術を利用して導波路の周波数分散特性を自由に制御することが可能な傾斜コルゲート構造を有する新しい右手/左手系導波管を提案している。本右手/左手系導波管を用いて周波数走査アンテナの試作と評価を行うことにより、4章で得られたビーム走査範囲よりも広がることを示すとともに、コルゲートの傾き角を小さくすることにより、ビー

ムをより広範囲に走査できる可能性を計算結果により明らかにしている。

第6章では、第1章から第5章で述べた検討結果を総括している。本論文で提案した漏れ波導波路を用いたビーム切換アンテナ、周波数走査アンテナがそれぞれハイビジョンワイヤレスカメラなどの放送番組素材伝送装置、ミリ波アクティブイメージングシステムに適用可能であることを述べ、本論文の検討結果が放送分野におけるミリ波アンテナのビーム制御の簡易化・高性能化のための一手段として有効であることを示している。

# 論文審査結果の要旨

ハイビジョンカメラからの画像伝送やミリ波イメージングなどのミリ波伝送・計測においては、アンテナのビームが鋭いことから、ビーム制御技術が重要となる。本論文はミリ波ビーム制御技術として誘電体線路、NRD ガイド並びに方形導波管からの漏れ波を利用したビーム切換アンテナ及び周波数走査アンテナを提案し、その有効性について研究を行った成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒言である。

第2章ではハイビジョンワイヤレスカメラからの信号を非圧縮で無線伝送するためのビーム切換アンテナとして、可動の周期金属ストリップを設けた方形誘電体アンテナを提案している。これはイメージガイドの表面波とこれに周期金属ストリップを装荷したときに生じる漏れ波を用いて、ビーム方向をそれぞれエンドファイヤ方向とブロードサイド方向に切換えるアンテナであり、設計・試作・評価の結果、55 GHzにおいて利得が約19 dBiのビーム切換アンテナが得られることを示している。

第3章では、ハイビジョンカメラ用として可動の金属リング付円筒誘電体線路を用いたビーム切換アンテナを提案している。このアンテナは第2章と同様に表面波と漏れ波を利用して、コンカルビームと全方向性指向性を切換える円筒誘電体線路アンテナである。設計と試作の結果、55 GHzにおいてそれぞれ約10 dBi及び12 dBiの利得が得られることを明らかにしている。このアンテナは、方向を変えながら移動するハイビジョンカメラ用のアンテナとして有用であると考えられる。

第4章では、ミリ波アクティブイメージングへの応用を目的として、NRD ガイドを用いた60 GHz帯周波数走査漏れ波アンテナについて述べている。まず、開口分布が一律で $10^\circ$ 程度の範囲でビームを走査可能な漏れ波アンテナの設計手順を示している。次に、設計されたアンテナを試作・評価し、ビーム幅 $1^\circ$ 以下で約 $10^\circ$ の範囲でビームを走査できることを示している。さらに、このアンテナにパラボラ・だ円反射鏡を設けて周波数走査と機械的走査を組み合わせることによりミリ波アクティブイメージング実験を行い、イメージングが可能であること示している。この成果はミリ波イメージングの実用化に向けた優れた成果である。

第5章では、ビーム走査範囲をさらに広げることを目的として、方形導波管内に金属コルゲーションを設けた右手系/左手系導波管周波数走査アンテナについて述べている。金属コルゲーションの傾斜配置によって誘電体の挿入を不要とする新たな左手系導波路構造を考案・導入し、周波数を下から上に走査することによって左手系から右手系に移行する導波管の設計を行った後に、導波管の上面にスリットを設けた周波数走査アンテナを試作し、その特性を評価して、60 GHz帯で1.8 GHz走査することにより、ビームを約 $12^\circ$ 走査できることを示している。さらに、この構造を用いることにより、ビームの走査範囲をさらに拡大できる可能性を示している。

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、誘電体線路、NRD ガイド並びに方形導波管からの漏れ波を利用したビーム切換アンテナ及び周波数走査アンテナを提案し、設計・試作によりその有効性を示したもので、電気・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。