

## 学位論文題名

誘電体レンズ装荷導波管スロットアンテナの電磁界解析  
および設計法に関する研究(Study on Electromagnetic Field Analysis and Design Method of Dielectric  
Lens Loaded Waveguide Slot Antennas)

## 学位論文内容の要旨

導波管にスロット穴を開けて放射素子として利用するアンテナを導波管スロットアンテナといい、マルチスロット化、またはアレー化することにより指向性アンテナとして利用される。周波数が高くなるほど導波管は小型化されるため、導波管スロットアンテナはミリ波帯における移動体通信システム向けの可搬用アンテナとしての応用が期待されている。

また、アンテナの放射特性を改善するために誘電体レンズを装荷する方法がある。これはレンズアンテナと呼ばれ、波長より大きい延長半球状のレンズが利用される場合が多い。レンズアンテナでは小さいアンテナ開口面でもビームを集中させ、指向性アンテナとして利用することが可能である。

以上述べた導波管スロットアンテナと誘電体レンズの長所を組み合わせることで可搬可能な小型指向性アンテナを開発することが本研究の目的である。そこで、小型球形の誘電体レンズをスロットに装荷することによりアンテナの放射特性を改善することを提案する。提案している誘電体レンズは波長よりも小さく、一般的なレンズアンテナと比較しても小型かつ軽量であり、高い可搬性が期待できる。

球形、かつ波長よりも小さい誘電体レンズを導波管スロットアンテナに装荷した場合、どの程度の収束効果が得られるのかわからない。しかし、提案している誘電体レンズ装荷導波管スロットアンテナは小さいアンテナ開口面積でも高利得な指向性アンテナとして利用できる可能性があり、スロット数を増やしてアレーアンテナ、平面アンテナへの適用も容易である。そして、発展的にミリ波帯移動体通信アンテナへの応用も期待される。

本研究では提案している小型球形誘電体レンズの性能を明らかにするために、導波管スロットアンテナおよび導波管スロットアレーアンテナの試作と測定および電磁界解析を行った。測定はマイクロ波帯の測定環境が整備されていることから 12GHz を対象周波数として行い、アンテナの電磁界解析には FDTD 法 (Finite Difference Time Domain method:有限差分時間領域法) を用いた。

最初に 1 スロット導波管スロットアンテナを試作して、遠方界放射パターンの測定および解析を行った。測定結果より、レンズ非装荷時に対するレンズ装荷時の放射電力の増加量は 5.8 dB であり、-3dB ビーム幅は H 面において 80.4 deg から 61.7 deg と狭くなった。すなわち、誘電体レンズの収束効果によりビームが収束し、正面方向の放射電力が増大することを明らかにした。また、FDTD 法による数値計算の結果は測定結果と良好に一致しており、シミュレーションの妥当性を確認することができた。

解析結果より、レンズの収束効果をレンズ収束量として定量的に表わすことを試みた。レンズ収束量はレンズ非装荷時と装荷時のスロット電力および放射電力により算出される。得られたレンズ収束量は比誘電率  $\epsilon_r = 1.8 \sim 7.0$  の範囲で  $5 \pm 1$  dB でほぼ一定であることを明らかにした。

また、延長半球レンズとの比較を行い、球形レンズ装荷時のスロット共振長は 10.5 mm、延長半球レンズ装荷時では 10.0 mm となり、どちらもレンズ非装荷時と比べて短くなることを示した。また、レンズ共振長におけるレンズ収束量の比較では、球形レンズでは 4.85 dB、延長半球レンズでは 4.03 dB となり、球形レンズが優位であることを明らかにした。

次に 8 スロット導波管スロットアレーアンテナの試作を行い、アレー化した場合の小型球形誘電体レンズの収束効果について検討した。遠方界放射パターンの測定結果より、アレーアンテナにおいてもレンズ装荷時に放射が増大することを明らかにした。また、測定結果と FDTD 法による計算結果はほぼ一致しており、アレーアンテナにおいても FDTD 解析が可能であることを示した。また、球形誘電体レンズの収束効果は延長半球レンズと比較しても同等以上であることを明らかにした。

また、誘電体レンズ装荷時にはスロットから放射されるビームの幅が狭くなることから、グレーティングローブ抑制効果も期待される。そこで、グレーティングローブが発生する条件で測定および解析を行った結果、提案しているレンズ装荷時にはグレーティングローブが 7.6 dB 低減することを示した。なお、グレーティングローブ

が抑制された結果、その一部が放射電力の増加に寄与すると考えられ、レンズ非装荷時と比較して放射電力は約 6 dB 増大した。

さらに、アレーアンテナの収束効果について解析的に検討した。非共振アレーアンテナを構成し、スロット数を変えた場合の放射電力およびスロット電力の変化について FDTD 法による計算を行った。E 面および H 面の -3 dB ビーム幅より、アレーアンテナにおける収束効果はほぼ E 面によって得られていることを明らかにした。また、アレーアンテナにおけるレンズ収束量は 4 スロット以上では  $2.4 \pm 0.3$  dB でほぼ一定であることを明らかにした。

誘電体レンズ装荷導波管スロットアレーアンテナの設計は、レンズ装荷によりスロットアドミタンスの理論式が未知であること、レンズ寸法が制約条件として追加されること、などの理由から困難が予想される。提案している誘電体レンズを用いたアンテナの設計には、より汎用性が高い新しい設計法が必要である。本研究では進化的計算手法の一つである  $\mu$ -GA (Genetic Algorithm: 遺伝的アルゴリズム) と目的関数の評価に FDTD 法を利用した最適化手法を新しいアンテナ設計法として提案し、その性能について検証した。

本研究では 8 スロット導波管スロットアレーアンテナを設計対象とした。アンテナは無反射終端とし、スロット間隔を 16.5 mm で固定し、各スロットのスロット長とスロットオフセットを設計パラメータとした。また、本研究ではビット型の遺伝子ではなく、実数型の遺伝子を採用した。

本設計法により、アンテナの開口面分布の最適化と低サイドローブ設計の 2 つの設計を行った。

アンテナの開口面分布の最適化設計では一様分布になるよう設計を行った。最適化されたアンテナを FDTD 法により計算した結果、近傍界電界分布のばらつきを抑制することができ、サイドローブレベルもメインローブに対して -13 dB 以下に抑制されていることを示した。

また、低サイドローブ設計では導波管スロットアレーアンテナを線状アレーアンテナとみなし、アレーファクタから得られるサイドローブ比を目的関数とした。アレーファクタに必要な各スロットの振幅と位相は FDTD 法により算出した。サイドローブ比 -20 dB の条件で最適化設計を行った結果、FDTD 法による計算では設定通りの性能が得られていることを示した。

以上より、波長より小さい球形の誘電体レンズでも 1 スロットおよびアレー化した導波管スロットアンテナにおいて収束効果が得られることを明らかにするとともに、その性能をレンズ収束量として定量的に明らかにした。また、提案した設計法は誘電体レンズ装荷導波管スロットアレーアンテナの設計が十分に可能であり、高い汎用性と設計性能があることを明らかにした。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 五十嵐 一  
副 査 教 授 小笠原 悟 司  
副 査 教 授 北 裕 幸

学位論文題名

## 誘電体レンズ装荷導波管スロットアンテナの電磁界解析 および設計法に関する研究

(Study on Electromagnetic Field Analysis and Design Method of Dielectric  
Lens Loaded Waveguide Slot Antennas)

本学位論文では、可搬性に優れた小型指向性アンテナの開発を目的として、小型球形の誘電体レンズを導波管スロットアンテナに装荷することを提案している。提案している誘電体レンズは真空中の電磁波長よりも小さく、一般的なレンズアンテナと比較しても小型かつ軽量である。レンズの収束効果により放射特性が改善されるだけでなく、高い可搬性も期待できる。本研究では提案している小型球形誘電体レンズの性能を明らかにするために、導波管スロットアンテナおよび導波管スロットアレーアンテナの試作と測定および電磁界解析を行っている。誘電体レンズの直径は 20mm であり、比誘電率は 2.2 である。測定はマイクロ波帯の測定環境が整備されていることから 12GHz を対象周波数として行い、アンテナの電磁界解析には FDTD 法 (Finite Difference Time Domain method:有限差分時間領域法) を用いている。

本論文の第 1 章では研究背景、研究目的について述べている。第 2 章では、導波管スロットアンテナの概要と、電磁界解析に用いた FDTD 法の基礎事項について述べている。

第 3 章では、1 スロット導波管スロットアンテナの実験結果および解析結果について詳細に論じている。著者は 1 スロットアンテナを試作して、遠方界放射パターンの測定および解析を行った。測定結果より、レンズ非装荷時に対するレンズ装荷時の放射電力の増加量は 5.8dB であり、-3dB ビーム幅は H 面において 80.4deg から 61.7deg と狭くなることがわかった。レンズ装荷時の放射電力は、誘電体レンズの収束効果とスロット電力の変化の両方に依存することを解析結果より明らかにしている。また、FDTD 法による数値計算の結果は測定結果と良好に一致しており、シミュレーションの妥当性を確認することができた。さらに、小型球形レンズの収束効果をレンズ収束量として定量的に評価した。得られたレンズ収束量は比誘電率が 1.6~8.5 の範囲において  $5 \pm 1$  dB でほぼ一定であり、一般的な延長半球レンズと比較してもレンズ収束量が大きいことを明らかにしている。

第 4 章では、8 スロット導波管スロットアレーアンテナの実験結果と解析結果について述べている。本アレーアンテナについての遠方界放射パターンを測定し、アレーアンテナにおいても 1 スロットの場合と同様にレンズ装荷時に放射が増大することを明らかにしている。また、グレーティングローブが発生する条件で測定および解析を行った結果、提案しているレンズ装荷時ではグレーティ

ングローブが7.6dB 低減することを示した。さらに、アレーアンテナの収束効果について解析的に検討した結果より、導波管スロットアレーアンテナにおける収束効果はほぼE面によって得られていることを明らかにした。また、アレーアンテナにおけるレンズ収束量は4スロット以上では2.4 ± 0.3dB でほぼ一定であることを示した。

第5章では、誘電体レンズ装荷導波管スロットアレーアンテナの進化論的最適化法について述べている。本研究では進化型計算手法の一つである $\mu$ -GA(Genetic Algorithm:遺伝的アルゴリズム)と目的関数の評価にFDTD法を利用した最適化手法を新しいアンテナ設計法として提案した。実数型遺伝子を用いた $\mu$ -GAにより、8スロット導波管スロットアレーアンテナについて、各スロットのスロット長とスロットオフセットを設計パラメータとして最適化を行った。アンテナの開口面分布が一様分布になるよう設計を行った結果、近傍界電界分布のばらつきを抑制し、サイドローブレベルも改善された。また、低サイドローブ設計では導波管スロットアレーアンテナを線状アレーアンテナとみなし、アレーファクタから得られるサイドローブ比を目的関数とした。本手法により設定されたサイドローブ比を満たすように最適化することができた。以上の結果より、提案した設計法によるアンテナ設計の有用性を示すことができた。

これを要するに、著者は、誘電体装荷導波管スロットアンテナについて実験および数値解析を行い、従来の導波管スロットアンテナに対する優位性を示しており、さらに、FDTD法と進化論的アルゴリズムに基づくスロットアンテナの新しい設計法を開発しており、電磁波工学、通信工学および電磁界解析学に対して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。