

電氣的小型アンテナの放射効率向上に関する研究

藤田 佳祐

論文の内容の要旨

本論文では波長に対して比較的小さな小型アンテナの放射効率を向上させることにより、性能の良いアンテナを設計することを目的としている。

最初に球面波展開を用いて球体全体を利用する小型アンテナの放射効率の最大化について考えた。アンテナを囲む仮想的な球の外側で、電磁界は同次の波動方程式の変数分離解であるモード関数とその重みである展開係数の線形結合で表現できるので、球形アンテナの電流分布を記述する展開係数と放射効率の関係式を定式化した。その結果から放射効率は、球形全体に一樣な **TM10** モードの電流によって励振された放射電磁界のみが放射された場合に放射効率が最大となることが示された。

次に導体に流れる電流の表皮効果と励振源からの給電を考慮すると、実用的な球形アンテナの実現可能性は低いので、実現性の高い電氣的小型球面アンテナについて考え、その放射効率に対する理論限界を解析的に導出した。表皮効果による良導体素子中の電流分布の集中を表すために、十分薄い球表面電流からの放射を記述するモード関数を新しく導入して解析すると、球面アンテナの場合でも球形の場合と同じように **TM10** モードが最大放射効率を与えるということ、さらに共振球面アンテナの最大放射効率時の電流分布を計算すると、螺旋状に電流が流れていることが示された。

理論的に検討した自己共振球面アンテナの実現可能な例として、球面上に給電ワイヤ素子を配置した球ヘリカルアンテナを提案し、数値計算によって最大放射効率を示す共振球面アンテナの電流と同じ向きにワイヤ素子を巻いたときに、放射効率が高くなることを示した。さらに、複数のワイヤ素子で折り返し構造をもつ球ヘリカルアンテナの放射効率は、ワイヤ素子本数が増えるにしたがって自己共振球面アンテナの放射効率に近づくことが示された。

最後に球ヘリカルアンテナの低入力インピーダンス対策として、非対称給電を提案している。これまでの折り返し構造では入力インピーダンスを実用的な値まで上げるためにはワイヤ素子数を多くする必要があり、アンテナが非常に小型になるとワイヤ素子が増えすぎて接触し実用的ではないという問題があった。そこで、給電素子の折り返し部分を切り離し、給電点を中心からずらすことによって、入力インピーダンスを増大させる方法を考案した。さらに提案したアンテナを製作し、共振周波数をワイヤ素子長で調整することによって所望の特性が得られることを確認した。

論文審査の結果の要旨

・論文の主題（テーマ）

波長に対して小型となるアンテナの放射効率の理論的な限界を示すこと、並びに放射効率が高い小型球ヘリカルアンテナの提案

・当該研究分野における位置づけ

通信のために用いるアンテナのサイズは、効率よく電波を送受信するためには通常、波長の4分の1程度の大きさが必要である。しかし小型化が進んだ無線通信機器において、このアンテナの大きさをその放射効率を落とさずに、更に小さくしたいという要求が増加している。アンテナの理論的な研究は、比較的古くから行われているが、これまではこうした小型化に関する研究は、アンテナ素子の電気回路的なQ値を最小化して使用できる帯域を広げるような観点からの研究が多く、放射効率を高くする観点からの研究は少なかった。そこで本研究では、電氣的に小型のアンテナの放射効率の理論的な限界について考え、どのようなアンテナが高い放射効率となるかを解明することによって、小型アンテナの高効率化に対する理論的な知見を深め、さらにそれを応用した高効率の球ヘリカルアンテナを設計することを目的としている。

・論文の構成

第1章 序論

最初に研究背景、本研究の目的について説明し、本論文の構成を示している。

第2章 球面波展開

最初に球形及び球面アンテナに対する放射効率の解析に用いる電磁界の球面波展開の導出を行う。次にアンテナ上に流れる電流から、球面波展開を用いて放射電磁界を求めている。

第3章 非共振球形アンテナの放射特性

球形アンテナの放射効率の最適化について考えている。球全体にアンテナ電流が流れていると仮定して、その電流が励振する電磁界に対する放射電力とアンテナ上に流れる電流に起因する損失電力を求め、それらから放射効率を計算する。次に任意形状の小型アンテナの損失電力を求めることにより、その小型アンテナを包含する球全体に電流が体積分布した球形アンテナが最大の放射効率を持つことを示している。さらにこの最大の放射効率をもつときの電磁界とその励振電流の様子について考察し、一般に使われる線状アンテナとの放射効率の違いについて考察している。

第4章 共振球面アンテナの放射効率

第3章で得られた球形アンテナは、球面全体に体積分布した励振電流を流すことができるという条件のもとに、導出した理論的な放射効率の最大値である。しかし表皮効果によって、実際はアンテナ導体表面にしか電流は流れないので、より現実的なアンテナを考える上では、球表面に励振電流が存在する球面アンテナを考える必要がある。そこで球面アンテナに対する放射効率を新たに定式化する。その際、実用的な励振を想定してアンテナを共振状態にした場合の放射効率を求め、それを最大化するための電流分布の様子について考察している。その結果、球表面に沿って螺旋状に電流が流れたときに、アンテナのもつ電氣的なエネルギーと磁氣的エネルギーを平衡させることができ、最大の放射効率となるようなワイヤ素子の螺旋状の巻き方を示した。さらに、この励振電流の流れる方向に沿ってアンテナワイヤ素子を配置したより現実的な球ヘリカルアンテナとした場合の放射効率を、ワイヤの本数や折り返し構造にした場合について導出している。

第5章 非対称給電球ヘリカルアンテナの提案

第4章で扱った球ヘリカルアンテナを効率よく励振するには、発振器側からみたアンテナの入力インピーダンスを実用的な値に整合させる必要がある。球ヘリカルアンテナを通常使われるアンテナ素子の中央で給電する場合には、アンテナの入力インピーダンスが低すぎて整合が難しく、それを改善するためには、通常給電素子を折り返し構造にする必要があるが、小型形状では折り返し構造を作りにくく、入力インピーダンスを制御することが容易でない。そこで、折り返し部分を給電素子から切り離して無給電素子とし、給電素子の給電をあえて中心給電からずらすことにより、入力インピーダンスを自由に制御できることを示した。最後にここで提案した球ヘリカルアンテナを実際に制作し、その入力インピーダンス特性を測定することにより、数値計算で得られた特性に近い実用的なアンテナが設計可能であることを示している。

第6章 結論

第5章までの研究内容を総括し、結論を述べるとともに、今後の課題について言及している。

・論文の独自性や成果および課題

電氣的な小型アンテナの放射効率について、球面波展開を利用して理論解析的な形で求め、その効率を最大にするための放射モードやそれらのモードを励振する電流分布について議論している。ここで得られた知見は独自性のある新しい結果である。球形アンテナから、より物理的に実現可能な球面アンテナや球ヘリカルアンテナについても、放射効率を計算し、最大の放射効率を持つようなワイヤ素子の螺旋状の巻き方を示し、実用的なアンテナとして入力インピーダンスを整合するために非対称給電を提案していることは注目される。加えて

実際に球ヘリカルアンテナを作成することによって、入力インピーダンスを整合することが可能であることを示しており、今後はここで提案されたアンテナの放射指向性や放射効率が、数値解析や測定結果とどの程度一致しているのか、さらなる検討が期待される。

・論文の評価

以上、まとめるに本論文で得られた電氣的小型アンテナの放射効率向上に対する理論的な解析結果に基づく知見は、小型アンテナを設計する上で重要なものであり、またその放射効率を向上させるための議論から提案した新しい球面ヘリカルアンテナは、従来のアンテナに比べて小型かつ放射効率の十分高い実用的なアンテナとして今後注目を浴びるアンテナと考えられる。よって本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。