

学 位 論 文 題 名

Determination of the Normalized Impedance of Slots  
in the Image NRD Guide and Characteristics  
of the Open-Ended Imate NRD Guide using  
the FDTD Technique

（イメージNRDガイドスロットアンテナの規格化インピーダンスと  
イメージNRDガイド端部アンテナのFDTD法による  
特性評価に関する研究）

学位論文内容の要旨

携帯電話、PHSをはじめとする無線を利用した移動体通信の需要が増大し、マイクロ波帯で利用できる周波数領域が逼迫しつつある今日において、周波数資源の確保の観点から未利用周波数領域であるミリ波帯における無線利用を見越した技術の確立が要求されている。ミリ波帯は、高周波回路が小型化できるとともに、周波数帯域を広く確保でき、伝搬距離が短いと周波数の空間的な利用効率を高くできるなど、無線システムを構築する上で有利な特性を兼ね備えている。

しかしながら、ミリ波帯においては、デバイスの挿入損失が大きく、安定して利用できる発振器等の開発が遅れていたこともあり、一部の応用を除いて、ミリ波帯の特性を活かしたアンテナは未開拓状態にある。このような背景の下で、ミリ波帯において挿入損失が非常に小さい非放射型誘電体導波路(Non-Radiative Dielectric Wave Guide;以下 NRDガイドと略する)が注目を集めている。NRDガイドにイメージ面を組み合わせたイメージNRDガイドはNRDガイドと同様に挿入損失が小さく、NRDガイドの半分の容積となることから、小形化に有利である。

イメージNRDガイドで構成したアンテナの一例として、イメージNRDガイドスロットアンテナがある。これは、イメージNRDガイドのイメージ面にスロットを配置したアンテナであり、スロットを線路に対して対称に配置できる。このため、スロットを設けた際に問題となるガイド内の不要モードの発生を回避できる。また、イメージNRDガイドの誘電体内の断面における界分布は矩形導波管のそれに類似しているため、導波管開口と同様に、イメージNRDガイド端部からの放射をアンテナとして利用できる。これらアンテナのアレーは、ミリ波帯アンテナとして有望である。

イメージNRDガイドスロットアンテナのアレー設計においては、イメージNRDガイドスロットアンテナの規格化インピーダンスを求めておく必要がある。また、イメージNRDガイド端部アンテナのアレーを実現するためには、ガイド端部からの放射特性を正確に把握することが重要である。

本論文はイメージNRDガイドスロットアンテナの規格化インピーダンスと、イメージNRDガイド端部アンテナの特性に着目し、これらの時間領域差分(FDTD)法による特性評価法について検討

した成果をまとめたものであり、第1章から第13章までの全13章で構成されている。

第1章は序論であり、NRDガイドおよびイメージNRDガイドに関する従来の研究例について説明するとともに、本論文の目的および構成を述べている。

第2章では、NRDガイドおよびイメージNRDガイドを伝搬するモードの電磁界表現式を導いている。イメージNRDガイドの主モードである $LSM_{10}$ モードについて分散特性、減衰特性、電磁界分布を求め、その特徴について論じている。

第3章では、第2章で導いたイメージNRDガイドの電磁界表現式に基づき、イメージNRDガイドスロットアンテナの等価回路を導いている。導波路の伝搬方向に対して垂直に配置したスロットアンテナ(以下、横スロットと称する)について検討を行い、イメージNRDガイドに対するスロットの効果は、線路に直列な規格化インピーダンスで表されることを明らかにしている。

第4章では、イメージNRDガイドスロットアンテナの規格化インピーダンスの決定法を列挙し、その原理について述べている。

第5章では、横スロットを設けたイメージNRDガイドの平行平板空気領域で観測した定在波分布を用いて、規格化インピーダンスを実験的に評価する方法(定在波法)に着目し、この手法を利用する際の問題点について議論している。FDTD法による解析結果を用いて、スロット近傍では高次モード散乱界の発生により定在波分布が乱れることを明らかにし、スロットから離れた位置での定在波分布から規格化インピーダンスを評価すべきであることを指摘している。

第6章では、イメージNRDガイドスロットアンテナをFDTD法によりモデル化し、イメージNRDガイドの定在波分布、および規格化インピーダンスを数値解析で求めるための検討を行っている。妥当な解析結果を得るための励振モデル、吸収境界条件について議論するとともに、FDTD解析結果から定在波分布および規格化インピーダンスを決定する手順を述べている。

第7章では、第6章で述べたFDTD解析により、スロットからの高次モード散乱界の影響が十分に小さくなるようなスロットからの最小距離を求めている。この最小距離データを定在波法に適用し、測定データから規格化インピーダンスを求めている。この結果と、FDTD解析で直接求めた規格化インピーダンスの両者が良く一致することを示し、提案した評価法の妥当性を確認している。

第8章では、イメージNRDガイドスロットアンテナについて検討した第3章から第7章に関して結論を述べ、その成果を要約している。

第9章では、イメージNRDガイド端部アンテナに着目し、その特性を実験的に評価するために用いるアンテナの構造を説明している。また、FDTD法を適用する際のモデル化について議論している。特に、給電プローブの効果を正確に考慮するためのモデル化について、詳細に検討している。

第10章では、第9章に述べたFDTD法の解析結果から、イメージNRDガイド端部アンテナの放射特性(絶対利得、放射パターン)を評価する際の手順について説明している。

第11章では、第9章および第10章に述べた手続きにより、イメージNRDガイド端部アンテナのFDTD解析を行い、その結果について議論している。また、実験結果と解析結果を比較し、両者は良く一致することを示し、本章で行ったFDTD解析の妥当性を明らかにしている。

第12章では、イメージNRDガイド端部アンテナについて検討した第9章から第11章に関して結論を述べ、その成果を要約している。

第13章は結論であり、論文全体の成果を要約している。

# 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 |
| 副査 | 教授 | 大宮 | 学  |

## 学位論文題名

### Determination of the Normalized Impedance of Slots in the Image NRD Guide and Characteristics of the Open-Ended Imate NRD Guide using the FDTD Technique

(イメージNRDガイドスロットアンテナの規格化インピーダンスと  
イメージNRDガイド端部アンテナのFDTD法による  
特性評価に関する研究)

携帯電話, PHSをはじめとする移動体通信の需要増大を受けて, 未利用周波数領域であるミリ波帯における無線利用を見越した技術の確立が要求されている。しかし, ミリ波帯の特性を活かしたアンテナは未開拓状態にある。このような背景の下で, ミリ波帯において挿入損が非常に小さい非放射型誘電体導波路 (Non-Radiative Dielectric Wave Guide; 以下 NRDガイドと略する) が注目を集めている。NRDガイドにイメージ面を組み合わせたイメージNRDガイドはNRDガイドと同様に挿入損が小さく, NRDガイドの半分の容積となることから, 小形化に有利である。

イメージNRDガイドで構成したアンテナとして, イメージNRDガイドスロットアンテナがある。また, 導波管開口と同様に, イメージNRDガイド端部からの放射をアンテナとして利用できる。これらアンテナのアレイは, ミリ波帯アンテナとして有望である。イメージNRDガイドスロットアンテナのアレイ設計においては, イメージNRDガイドスロットアンテナの規格化インピーダンスを求めておく必要がある。また, イメージNRDガイド端部アンテナのアレイを実現するためには, ガイド端部からの放射特性を正確に把握することが重要である。

本論文はイメージNRDガイドスロットアンテナの規格化インピーダンスと, イメージNRDガイド端部アンテナの特性に着目し, これらの時間領域差分(FDTD)法による特性評価法について検討した成果をまとめたものであり, 第1章から第13章までの全13章で構成されている。

第1章は序論であり, NRDガイドおよびイメージNRDガイドに関する従来の研究例について

説明するとともに、本論文の目的および構成を述べている。

第2章では、NRDガイドおよびイメージNRDガイドを伝搬するモードの電磁界表現式を導いている。イメージNRDガイドの主モードである $LSM_{10}$ モードについて分散特性、減衰特性、電磁界分布を求め、その特徴について論じている。

第3章では、第2章で導いたイメージNRDガイドの電磁界表現式に基づき、イメージNRDガイドスロットアンテナの等価回路を導いている。導波路の伝搬方向に対して垂直に配置したスロットアンテナ(以下、横スロットと称する)について検討を行い、イメージNRDガイドに対する横スロットの効果は、線路に直列な規格化インピーダンスで表されることを明らかにしている。

第4章では、イメージNRDガイドスロットアンテナの規格化インピーダンスの決定法を列挙し、その原理について述べている。

第5章では、横スロットを設けたイメージNRDガイドの平行平板空気領域で観測した定在波分布を用いて、規格化インピーダンスを実験的に評価する方法(定在波法)に着目し、この手法を利用する際の問題点について議論している。FDTD法による解析結果を用いて、スロット近傍では高次モード散乱界の発生により定在波分布が乱れることを明らかにし、スロットから離れた位置での定在波分布から規格化インピーダンスを評価すべきであることを指摘している。

第6章では、イメージNRDガイドスロットアンテナをFDTD法によりモデル化し、イメージNRDガイドの定在波分布、および規格化インピーダンスを数値解析で求めるための検討を行っている。妥当な解析結果を得るための励振モデル、吸収境界条件について議論するとともに、FDTD解析結果から定在波分布および規格化インピーダンスを決定する手順を述べている。

第7章では、第6章で述べたFDTD解析により、スロットからの高次モード散乱界の影響が十分に小さくなるようなスロットからの最小距離を求めている。この最小距離データを定在波法に適用し、測定データから規格化インピーダンスを求めている。この結果と、FDTD解析で直接求めた規格化インピーダンスの両者が良く一致することを示し、提案した評価法の妥当性を確認している。

第8章では、イメージNRDガイドスロットアンテナについて検討した第3章から第7章に関して結論を述べ、その成果を要約している。

第9章では、イメージNRDガイド端部アンテナに着目し、その特性を実験的に評価するために用いるアンテナの構造を説明している。また、FDTD法を適用する際のモデル化について議論している。特に、給電プローブの効果を正確に考慮するためのモデル化について、詳細に検討している。

第10章では、第9章に述べたFDTD法の解析結果から、イメージNRDガイド端部アンテナの放射特性(絶対利得、放射パターン)を評価する際の手順について説明している。

第11章では、第9章および第10章に述べた手続きにより、イメージNRDガイド端部アンテナのFDTD解析を行い、その結果について議論している。また、実験結果と解析結果を比較し、両者は良く一致することを示し、本章で行ったFDTD解析の妥当性を明らかにしている。

第12章では、イメージNRDガイド端部アンテナについて検討した第9章から第11章に関して結論を述べ、その成果を要約している。

第13章は結論であり、論文全体の成果を要約している。

これを要するに、著者は、イメージNRDガイドスロットアンテナの規格化インピーダンスと、イメージNRDガイド端部アンテナの特性評価法に関する有益な知見を得たものであり、アン

テナ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。