

## 学位論文題名

## 高分解能推定法を用いた電磁波計測に関する研究

## 学位論文内容の要旨

近年、エレクトロニクスの進歩により、電磁波は通信、レーダなど広い範囲で利用されている。これに伴い、電磁波計測技術が極めて重要となっている。

マイクロ波・ミリ波帯におけるデバイスの測定・評価にはネットワークアナライザが多く用いられている。これは周波数領域での電磁波の振る舞いを反射・伝送係数として測定する装置であり、アンテナ測定、電磁波回路測定などに用いられている。ネットワークアナライザにはもうひとつタイムドメイン機能と呼ばれるものがあり、周波数領域データを高速逆フーリエ変換し、時間領域データを得ることができる。この機能は、デバイスの時間領域特性に着目するのであれば、非常に有用なものとなりえる。

また、あるデバイスにおける時間領域応答が必要でない場合でも、時間領域応答は測定の不完全さを取り除くために用いられる。例えば、コネクタによる微小な反射は周波数領域では検出することが困難であるが、時間領域に変換すればその反射は明らかになる。この反射波は、ゲーティング機能で取り除くことができる。その後、高速フーリエ変換をすることにより周波数領域データに戻すことができる。このようにして、不完全なコネクタによる誤差を含まない周波数領域での測定が実現できる。更に、タイムドメイン機能は電磁波散乱のメカニズムの解析やレーダターゲットの識別に有効である。

しかし、正しくゲーティング機能が作用するには、個々の応答が十分に分離されている必要があり、広い帯域の周波数領域データを必要とする。よって、狭帯域アンテナ等の測定においては、限られた周波数帯域でしか周波数領域データが得られないため、フーリエ変換を用いた方法では十分な分解能特性が実現されない。

このような背景から狭い帯域で良好な特性が得られる高分解能推定法のひとつである MUSIC アルゴリズム、および、その変形手法である Root MUSIC アルゴリズムを用いた時間領域測定法が提案されてきたが、これらには「信号は遅延時間による位相遅れ以外の周波数特性を有しない」という仮定がある。種々のデバイスの反射・伝送測定において信号が上記以外の周波数特性を有することは多々あり、この場合 MUSIC アルゴリズムはその特性を劣化させることになる。つまり、十分な精度を持った遅延時間推定、信号パラメータの周波数特性推定ができない。

そこで、その問題点を解決するため、および、従来の遅延時間推定のみならず周波数特性まで推定することを目的として提案されたのが改良型 Root MUSIC 法である。この手法は、測定データに対し、周波数特性を表す重み関数の逆特性を乗算することにより、周波数特性の劣化を打ち消すと共に周波数特性の推定を実現している。この改良型

Root MUSIC 法を用いた高分解能時間領域推定に着目しているものが本論文である。以下に本論文の要旨を述べる。

第1章では、研究の背景と目的を明らかにするとともに、本論文の概要を示す。

第2章では、MUSIC アルゴリズム、Root MUSIC アルゴリズムを用いた高分解能時間領域推定について述べ、フーリエ変換法に比べて、良好な特性が得られることを示す。従来、MUSIC アルゴリズムは狭帯域アンテナ測定など、狭い帯域幅の周波数領域データしか得られないため、フーリエ変換法では十分な分解能特性が実現されないとき、高分解能特性を得ることを実現するため用いられてきた。しかし、相当広い帯域の周波数領域データが得られる被測定物の測定においては測定に必要な帯域幅を狭めることは重要ではない。すなわち、フーリエ変換法では最大限に可能な広帯域周波数領域データを用いても分離できないほど接近している個々の応答をMUSIC アルゴリズムを用いて分離することが重要となる。第2章ではこのような立場からマイクロ波回路測定に対し、MUSIC アルゴリズム、および、Root MUSIC アルゴリズムを適用し、その有効性について論ずる。また、信号数が多い場合には、MUSIC アルゴリズムの特性が劣化することから、ゲーティング機能を用いて信号数を制限し、より高分解能な推定を行う。

第3章では、従来の遅延時間のみならず到来方向も同時に推定する二次元 MUSIC アルゴリズムについて論ずる。一次元の場合同様、フーリエ変換法に比べて高分解能な推定ができることを示し、室内伝搬実験についての適用結果を示す。第2章のマイクロ波回路測定と同様にフーリエ変換（ゲーティング）と相補的に用いることにより高分解能な推定ができることを示す。

第4章では、MUSIC アルゴリズムが、周波数特性を有する信号に対しては特性の劣化をきたすことを述べ、その解決手法である改良型 Root MUSIC 法の適用法を定式化している。改良型 Root MUSIC 法で、周波数特性の逆特性を乗算する際、周波数特性が事前に既知の場合、適当なパラメータにより周波数特性を表し、それを変数として遅延時間と周波数特性の推定を行う。一方、周波数特性は事前には通常は困難であることが多い。この場合には、周波数特性を Taylor 展開をした後、改良型 Root MUSIC 法を適用することを試みる。また、周波数特性を有する場合には、相関抑圧前処理での誤差が生じる。そこで、周波数特性推定精度改善のため、推定したい信号以外をノッチフィルタリングで除去することを示す。

第5章では、周波数特性を有する信号に対し、改良型 Root MUSIC 法を適用した数値結果を示す。振幅に周波数特性を有する例として電磁波散乱を考える。具体的には、導体球による後方散乱、導体矩形板、無限ストリップによる後方散乱に対し、改良型 Root MUSIC 法を適用する。周波数特性を既知とした場合や直線近似した場合の推定精度の違いやノッチフィルタリングを行った場合の推定精度の改善効果などについて計算機シミュレーションにより示す。また、位相に周波数特性を有する伝送路である導波管に対し、改良型 Root MUSIC 法を適用することを試みる。導波管内の不連続点における反射波は周波数によって位相速度が異なるため、遅延時間がある幅をもって現れる。このような場合、遅延時間を推定することは重要ではなく、どこに不連続点があるかということ（位置情報）が重要となってくる。ここでは、2つの不連続点をもった導波管モデルに対し、改良型 Root MUSIC 法を適用して不連続点の検出を行う。また、ノッチフィルタリングにより精度の向上を図っている。

第6章で以上を要約している。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 川 恭 孝

副 査 教 授 伊 藤 精 彦

副 査 教 授 小 柴 正 則

## 学 位 論 文 題 名

### 高分解能推定法を用いた電磁波計測に関する研究

近年、電磁波の計測技術が極めて重要となっている。この背景には、高度な通信方式の普及、レーダ技術の発展、様々な電磁波応用技術の進展がある。

従来、電磁波の測定にはネットワークアナライザが多く用いられてきた。これにより、各種の電磁波デバイス、アンテナ、電磁波散乱体の反射係数、伝送係数、散乱係数が周波数の関数として求められる。近年開発されているネットワークアナライザにはタイムドメイン機能が付加されている。これは、測定された周波数領域データを高速逆フーリエ変換し、時間領域データを得ることを可能とするものである。さらに、タイムドメイン機能を用いるとゲーティングと呼ばれる時間領域でのフィルタリングが可能となる。すなわち、ある時刻に存在する応答が不要である場合、時間領域でこの応答を除くことができる。たとえば、導体球による散乱波の中でクリーピング波のみを抽出するゲートをかけることによって正規反射波の応答を抑圧することができる。その後、高速フーリエ変換を行うことによりクリーピング波のみの周波数特性が得られる。しかし、正しくゲーティング機能が作用するには、個々の応答が十分に分離されている必要があり、広い帯域の周波数領域データを必要とする。従って、狭帯域なマイクロ波回路等の測定においては、限られた周波数帯域でしか周波数領域データが得られないため、フーリエ変換に基づくタイムドメイン機能を用いては十分な分解能が実現されないという問題点があった。

このような背景から狭い帯域で良好な特性が得られる高分解能推定法のひとつである MUSIC アルゴリズム、および、その変形手法である Root MUSIC アルゴリズムを用いた時間領域測定法が提案されてきた。

本論文は、これらの高分解能推定法を用いた電磁波計測についての研究成果をまとめたものであり、その主要な成果は以下のように要約される。

1) マイクロ波回路について MUSIC アルゴリズムと Root MUSIC アルゴリズムの時間応答推定の高分解能性を示した。これらの手法は数少ない信号を高い分解能で推定する際には有効であるが信号数が多いときには特性が劣化する。ゲーティングを先に行うことによって信号数を減少させた後、MUSIC アルゴリズムあるいは Root

MUSIC アルゴリズムを適用することによって性能が改善されることを示した。

2) 将来の高速無線 LAN 等を実現するためには室内における多重波伝搬構造(多重波の到来方向と遅延時間)の解明が必要となる。この推定を高分解能で行う二次元 MUSIC アルゴリズムの定式化を行った。一般に室内での多重波数は極めて多いため、全体を二次元逆フーリエ変換で大域的な推定を行い、その結果にゲーティングを適用して小領域に分割した。各小領域に二次元 MUSIC アルゴリズムを適用することにより、高分解能な伝搬構造の解明が可能であることを計算機シミュレーション、および、実験により明らかにした。

3) MUSIC アルゴリズム、および、Root MUSIC アルゴリズムは、信号が伝搬遅延時間による位相遅れ以外の周波数特性を有しないという仮定に基づいている。この仮定が成立しない場合、これらの手法はその特性を劣化させることになる。この問題点を解決し、周波数特性も同時に推定可能な改良型 Root MUSIC アルゴリズムの定式化を行った。また、改良型 Root MUSIC アルゴリズムを適用する際に用いる周波数特性の関数形が未知の場合には、Taylor 展開近似を用いることを提案した。これらを電磁波散乱問題等に適用し、遅延時間と周波数特性の同時推定が可能であることを明らかにした。

これを要するに、著者は MUSIC アルゴリズムに基づいた高分解能推定法の特性改善、適用領域の拡張を行うなど、電磁波計測技術に関して有益な新知見を得たものであり、電磁波工学の進歩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。