

学 位 論 文 題 名

スーパーレゾリューション法による電磁波測定と
その応用に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、種々の電磁波測定において用いられている時間領域測定法の問題点を指摘し、その解決法としてスーパーレゾリューション法の適用が有効であることを理論、計算機シミュレーション、実験を通して明らかにした研究成果をまとめたものである。

近年の情報通信分野の急速な発展は、衛星放送、移動体通信などを我々の身近なものとするに至った。そこには、数多くの研究者の理論、実験を通じた高周波デバイス開発、電波伝播の解明がある。21世紀の高度通信社会では、マイクロ波、さらにはミリ波帯のデバイス開発、電波伝播解明が不可欠である。このためには、解析手法（理論）ばかりでなく、それを検証するための測定（実験）法の確立が必要である。理想的な高周波測定を実現するのは、一般に困難であり、目的に合わせた種々の測定法が考案されてきた。アンテナパタン測定において大地の影響を軽減させるための測定場なども、その一例である。このように高周波測定では、不要な応答を除去し高精度な測定を実現するために、測定系に対して物理的・機械的な変更を必要とするものが少なくない。

高周波分野で多用される測定器にネットワークアナライザがある。これは周波数領域での電磁波の振舞いを反射・伝送係数として測定する装置であり、近年では、デバイスのネットワーク解析のみならず、アンテナ測定、電磁波散乱測定など、広く、電磁波測定全般に利用されるようになってきている。エレクトロニクス、特にマイクロプロセッサの発達は、本測定器における時間領域測定を可能とさせた。これは、タイムドメイン機能と呼ばれ、測定周波数帯域データに対して高速フーリエ変換を施すことにより、時間応答波形を描画させるものである。デバイス、あるいは空間を伝播した電磁波は、時間領域においてその伝播経路長に応じた応答として現れる。これにより、我々は各部からの応答を直接識別することが可能となった。

タイムドメイン機能は測定法としても有効であり、時間領域において不要な応答を取り除き、再び、周波数領域に変換することにより所望する部分のみの周波数応答を得ることを可能として

いる。これらはすべて数値演算処理に基づくため、測定系の機械的な変更を施すことなく、測定精度の向上が可能である。しかしながら、フーリエ変換法に基づく手法であるため、時間領域でのレスポンス分解能が測定周波数帯域幅に依存するという欠点を有する。狭帯域デバイスの多い高周波素子では測定が、この欠点により制約される場合が多い。小型化が進むマイクロ波・ミリ波素子においてのみならず、アンテナ・散乱測定においても周波数帯域幅の制約を越えた分解能を有する時間領域法を開発する意義は大きい。

そこで本論文では、スーパーレゾリューション法の高分解能性に着目し、その電磁波測定に対する適用を検討した。スーパーレゾリューション法は、主にアレーアンテナでの波源の到来方向（空間スペクトル）推定に用いられる手法であり、アレー長に依存しない分解能性を実現するものである。本論文では、数多く提案されているスーパーレゾリューション法の中から代表的な手法である MUSIC アルゴリズムを取り上げ、ネットワークアナライザでの測定で得られる周波数データサンプルとアレー素子配列との対応関係に着目し、その適用可能性を明らかにしている。ネットワークアナライザで実現される代表的な電磁波測定系での実験を通し、本手法が従来のタイムドメイン機能に比べ、数分の一から数十分の一の周波数帯域での時間領域測定を明らかにした。以下、本研究により得られた結果および考察を各章に分けて説明する。

第1章では、本論文の背景および概要について述べている。

第2章では、ネットワークアナライザで実現されているタイムドメイン機能を用いた電磁波測定法をまとめるとともに、その分解能特性を定量的に明らかにした。また、波源の到来方向で用いられる MUSIC アルゴリズムの概略をまとめ、周波数領域データとの対応を明らかにした。さらに、アレーアンテナでの適用時と同様、周波数領域においても信号相関処理が必要なことを明らかにし、空間スムージング法による前処理法が有効であることを示した。

第3章では、第2章で提案した信号相関抑圧前処理法と MUSIC アルゴリズムの組合せが電磁波回路の時間領域測定法として有効であることを明らかにした。ここでは、前処理法の相関抑圧効果の定量的な考察を行い、デバイスの不連続点検出の実験を通し、従来法の数十分の一の周波数帯域幅で、各部の応答の分離検出が可能であることを示した。

第4章では、アンテナゲインおよびパタン測定に対する適用結果を示した。アンテナ測定では、被測定アンテナの使用周波数帯域データのみでの不要波の分離検出が必要とされる。電波無響室内に作成した多重伝播空間での実験を通して、その適用可能性を検証した。さらに、従来の時間領域機能を併用することにより、測定データ数の軽減による測定時間の短縮が図られることを明らかにした。

第5章では、時間領域において分離される個々の応答の周波数特性が MUSIC アルゴリズムおよび信号相関抑圧前処理に及ぼす影響に関する理論的な検討を行っている。ここでは、特にスーパーレゾリューション法の適用が期待される散乱測定を考慮して、クリーピング波、エッジ回折波などに対応する周波数特性を有する信号が含まれるデータを取り上げ、それらの存在時の適用での入射信号数推定、および、時間応用推定時の誤差特性などに関する定量的検討を行い、周波数特性を有する信号の取り扱いが困難とされる MUSIC アルゴリズムが、上記の周波数特性を有する信号に関しては、実用上、十分な分解能特性を実現していることを、理論、数値計算により明らかにしている。

第6章は、実際に散乱測定系を構築し、第5章での考察結果を実験的に検証し、さらに、散乱測定に対しても従来法に対する本手法の優位性が維持されることを明らかにした。さらに本手法による、アンテナあるいは散乱体を移動させて得られたデータ処理による、散乱点の空間的な位置検出結果も示し、散乱体の形状推定などに対する適用可能性を示した。

第7章は、結論であり、本研究内容と得られた成果を最後に統括している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	伊藤 精彦
副査	教授	小川 吉彦
副査	教授	小柴 正則
副査	教授	永井 信夫

本論文は、電磁波測定において用いられている時間領域測定法の問題点を指摘し、その解決法としてスーパーレゾリューション法の適用が有効であることを理論、計算機シミュレーション、実験を通して明らかにした研究成果をまとめたものである。

近年の情報通信分野の急速な発展は、衛星放送、移動体通信などを我々の身近なものとさせるに至った。このような高周波帯での機器の諸特性の高精度な測定は、一般に困難であり、目的に合わせて種々の測定法が考案されてきた。これらの多くは、測定時の不要な信号の混入を防ぐために、測定系に対して物理的・機械的な変更を必要とするものであった。一方、高周波分野で多用される測定器、ネットワークアナライザでは、近年、タイムドメイン機能と呼ばれる時間領域

機能を有するものがみられ、フーリエ変換法を用いた時間領域処理により、数値演算処理による不要入射波の除去、測定精度の向上を図ることが可能となっている。しかしながら、これはフーリエ変換法に基づく手法であるため、時間領域でのレスポンス分解能が測定周波数帯域幅に依存するという欠点を有する。したがって、小型化が進むマイクロ波・ミリ波素子においてのみならず、アンテナ・散乱測定においても周波数帯域幅の制約を越えた分解能を有する時間領域法を開発する意義は大きい。

そこで本論文では、主にアレーアンテナでの波源の到来方向推定に用いられるスーパーレゾリューション法の高分解能性に着目し、その電磁波測定に対する適用を検討した。ここでは、数多く提案されているスーパーレゾリューション法の中から代表的な手法である MUSIC アルゴリズムを取り上げ、ネットワークアナライザでの測定で得られる周波数データサンプルとアレー素子配列との対応関係に着目し、その適用可能性を明らかにしている。また、ネットワークアナライザで実現される代表的な電磁波測定系での実験を通し、本手法が従来のタイムドメイン機能に比べ、数分の一から数十分の一の周波数帯域での時間領域測定を明らかにした。以下、本研究により得られた結果および考察を各章に分けて説明する。

第1章では、本論文の背景および概要について述べている。

第2章では、タイムドメイン機能を用いた電磁波測定法の概略を紹介し、その分野能特性を定量的に明らかにした。また、空間領域、周波数領域でのデータの対応関係を明らかにし、MUSIC アルゴリズムの適用可能性を示した。さらに、信号相関処理が必要となることを明らかにし、空間スムージング法の適用を提案した。

第3章では、信号相関抑圧前処理法と MUSIC アルゴリズムの組合せが電磁波回路の時間領域測定法として有効であることを明らかにした。ここでは、前処理法の相関抑圧効果の定量的な考察、および、デバイスの不連続点検出の実験を通し、従来法の数十分の一の周波数帯域幅で、各部の応答の分離検出が可能であることを示した。

第4章では、アンテナゲインおよびパタン測定に対する適用結果を示した。アンテナ測定では、被測定アンテナの使用周波数帯域データのみでの不要波の分離検出が必要とされる。電波無響室内に作成した多重伝搬空間での実験を通して、その適用可能性を検証した。さらに、従来の時間領域機能を併用することにより、測定データ数の軽減による測定時間の短縮が図られることを明らかにした。

第5章では、時間領域において分離される個々の応答の周波数特性が MUSIC アルゴリズムおよび信号相関抑圧前処理に及ぼす影響に関する理論的な検討を行っている。ここでは、特に電

磁波散乱測定で観測される周波数特性を有する信号が含まれるデータを取り上げ、入射信号数測定、および、時間応答推定に及ぼす誤差特性の定量的検討を行い、実用上、MUSIC アルゴリズムが有効となることを明らかにした。

第 6 章は、実際に散乱測定系を構築し、その実験結果により、散乱測定時の本手法の優位性を実証した。また、アンテナあるいは散乱体を移動させて得られたデータ処理により、散乱体の形状推定などが可能となることを示した。

第 7 章は、結論であり、本研究内容と得られた成果を最後に統括している。

これを要するに、著者は、高周波・マイクロ波測定において近年注目されている時間領域手法の問題点の解決法の一手法として、測定時の周波数帯域幅により制限される従来法に代わる高分解能時間領域手法を提案したものであり、電磁波工学、および電子工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。