

等間隔円形アレーアンテナにおける コヒーレント近接多重波到来方向推定方法の研究

学位論文内容の要旨

電波の利用は、放送・通信・航空保安管制・気象防災といった社会インフラをはじめとして、科学計測等極めて広い範囲のシステムに渡り、情報伝達・センシング等の手段として先進的な開発が継続的に行われている。これらのシステムの動作においては、使用される場所における電磁波環境・電波伝搬環境が重要な要素となり、それらを正しく把握することがシステム性能確保のために必要である。このため、周波数軸に対する電界強度分布に加え、時間軸・空間軸としての伝搬チャネル特性の測定が用いられるが、そこにおける到来角度プロファイルの情報を得るために到来方向推定が必要となる。一方、到来方向推定機能そのものがシステムの重要な機能となる例としては、通信システムにおけるスマートアンテナ機能、画像とともに電波発射源を可視化する機能、あるいはレーダシステムのように位置を特定する機能がある。

これらにおける到来方向推定機能を実現するにあたり、電磁波環境および電波伝搬環境に関わる主要課題として、1) アンテナ相互および近傍物体との電磁的結合、近傍物体での散乱・再放射、2) 伝搬経路の多様性、3) 同一チャネルに存在する干渉波・方向性外来雑音等が挙げられ、いずれもシステム構築上検討を欠かすことができないものとなっている。

本論文においてはその中でも、2), 3) が複合し困難性が高い「近接したコヒーレントマルチパス波が同時に複数存在する環境」を扱う。さらに、一般的に一次元問題としての議論が多い中で、二次元問題を扱うため等間隔円形アレー (UCA: Uniform Circular Array) を対象としている。

第1章は序論であり、研究の背景と本論文の目的、構成について述べている。

第2章では、研究対象とするコヒーレント波あるいは多重波を考慮したものを中心とした既存の二次元到来方向推定手法について述べ、それらのコヒーレント近接多重波における課題および本論文の内容との関係を示している。

第3章から第6章にかけては、著者の研究成果を記している。

第3章においては、先ず素波間の相関が1の場合とそうでない場合における到来方向推定への影響を示し、相関1における影響の大きさから研究の重要性を述べている。次に、複数多重波の分離手法として、独立成分分析の一種である自己共分散を独立性の判定根拠とする手法を採用し、その手法において、多重波でない到来波の分離よりも多重波である場合の方が分離性能が確保し易い状態を示している。また、この分離手法で推定したモードベクトルの誤差が、信号分離度と到来方向推定誤差にどのように関係するかを示している。さらに、多重波状態において推定したモードベクトルに対して、多重波を考慮していない到来方向推定手法を適用すると極めて誤差が大きくなる状態を示し

ている。この状態を解決するために多重波の中心方向(素波電力の加重平均方向)を推定する手法に着目し、第4章、第5章で展開している。

第4章においては、多重波の角度広がりがビーム半値幅程度の場合を想定して一次のテーラー展開近似を用いた定式化を行い、マルチパスによるひずみの状態を示す指標として「マルチパスひずみベクトル」の概念を導入している。これにより、このベクトルを平面上に図形として描いたときに、多重波の中心方向において特徴的な図形となることを示し、この特徴を用いた角度スペクトルの評価関数を導いている。これにより、既存手法である一般化アレーマニフォールドにおける一般化固有値問題を解く手法と極めて近い性能が得られ、かつ演算が単純化される。さらに一般化アレーマニフォールドにおいて問題となるマルチパスひずみの小さい状態において、誤差が大きくなる問題への対応方法を示しているが、アルゴリズムの切り替えを必要としている。

第5章においては、マルチパスの影響の大小によるアルゴリズムの切り替えなしで、1素波の状態からビーム半値幅の2倍程度の角度広がりを持つ多重波に広く対応可能な手法を導いている。基本的な考え方としては、観測した多重波モードベクトルと、多重波が存在すると想定される範囲内のモードベクトル群の線形和により予測したベクトルとのフィッティング問題である。モードベクトル群から生成した行列の逆行列と、観測ベクトルの2次形式により角度スペクトルの評価関数を構築しており、モードベクトル群の範囲をサーチする手法である。この評価関数は、素波電力の加重平均方向と任意の素波のペアの中間方向を示す項の合成による関数となっており、全体の動作として中心に近づく性質を有するものである。これより、多くの到来方向推定手法がベクトルをサーチするのに対して、多重波に対しては行列をサーチすることの有効性を示すものである。また、演算負荷軽減の観点から、範囲をステップ的に切り替え、かつ角度広がりやサーチを行わない場合と、角度広がりもステップ的に変化させる方法を示している。角度広がりやサーチを行わない場合は角度広がりやビーム半値幅程度まで対応可能であり、角度広がりやそれ以上になる場合は角度広がりやのサーチが必要となる。ただし、ビーム半値幅の2倍程度が上限であり、これは角度スペクトルの評価関数がビーム形状への依存性があることによる。

第6章においては、第5章の結果として得られる多重波の中心方向と角度広がりを利用して、素波数が少ないという前提のもとに、素波個々の到来方向を推定する手法を示している。一つは数理計画法(最適化問題)を適用したL1ノルムによる手法であり、他方は従来手法の代表例と言えるSAGE法である。L1ノルムによる手法はSAGE法において問題となる素波数指定と初期方向設定が不要となる大きな利点が見られることを示している。しかしながら、極めて条件が悪い中での最適化であり、結果のあいまい性(解が一意的でないこと)が避けられず、その軽減策について示している。多重波状態においては素波間位相差の影響が大きいことが、素波間位相差の分布が時間的に変化するという前提が成立すれば、ヒストグラムから推定が可能であることを示している。なお、位相差を固定としても、初期方向設定が不要である利点は同様に得られる。さらに、L1ノルムによる手法の推定方向をSAGE法の初期値とすることで結果が改善される場合があり、性質の異なる2つの手法をうまく組み合わせることにより総合的な推定精度の向上が可能であることを示している。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果を要約し、今後の課題について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 川 恭 孝

副 査 教 授 宮 永 喜 一

副 査 教 授 野 島 俊 雄

副 査 教 授 小 柴 正 則

学 位 論 文 題 名

等間隔円形アレーアンテナにおける コヒーレント近接多重波到来方向推定方法の研究

電波は、携帯電話などの無線通信、放送、レーダによる遠隔探知など、現代社会を支えるために広く利用されるに至っている。電波伝搬環境を把握することが、その利用形態をより高度化する上で重要であると言える。また、電波の到来方向を正しく推定することは、航空機などの移動体の監視や違法電波源の特定などに極めて重要となる。また、通信システムにおけるスマートアンテナの制御、あるいは、その評価にも到来方向推定が必要となることがある。到来方向推定を実現するにあたり、電波伝搬環境に関して、伝搬経路の多様性、同一チャネルに存在する干渉波・方向性外来雑音等が検討課題として挙げられる。本論文は、これらが複合し困難性が高い、近接したコヒーレント多重波が同時に複数存在する環境に関して、著者が行ってきた等間隔円形アレーを用いた推定法についての研究成果をまとめたものであり、全体は7章で構成されている。

第1章は序論であり、研究の背景と本論文の目的、構成について述べている。

第2章では、既存の二次元到来方向推定法として、研究対象とする多重波を考慮した手法について述べ、その課題と本論文との関連を明らかにしている。

第3章から第6章において著者の研究成果が述べられている。

第3章では、先ず素波間の相関が1の場合には、到来方向推定への影響が大きいことを論じている。次に、複数の多重波が存在する場合の分離手法として採用する独立成分分析のアルゴリズムについて述べ、多重波でない到来波の分離よりも多重波である場合の方が分離性能が確保し易い状態を示している。また、この分離手法で推定したモードベクトルの誤差が、信号分離度と到来方向推定誤差に与える関係を明らかにしている。さらに、多重波状態において推定したモードベクトルに対して、多重波を考慮していない到来方向推定手法

を適用すると極めて誤差が大きくなることを述べている。

第4章においては、多重波の角度広がりがあるビーム半値幅程度の場合を想定して一次のテーラー展開近似を用いた定式化を行っている。これにより、既存手法である一般化アレーマニフォールドにおける一般化固有値問題を解く手法と極めて近い性能が得られ、かつ演算が単純化されることを述べている。さらに、一般化アレーマニフォールドにおいて問題となる多重波ひずみの小さい状態において誤差が大きくなる問題への対応方法としてアルゴリズムを切り替える手法を示している。

第5章においては、多重波の影響の大小によるアルゴリズムの切り替えなしで、1素波の状態からビーム半値幅の2倍程度の角度広がりを有する多重波に広く対応可能な手法を導いている。提案手法の評価関数は、素波電力の加重平均方向と任意の素波のペアの中間方向を示す項の合成による関数となっており、全体の動作として中心に近づく性質を有するものである。これより、多くの到来方向推定手法がベクトルをサーチするのに対して、多重波に対しては行列をサーチすることの有効性が示されたと言える。また、演算負荷軽減法を明らかにするとともに、この手法の適用範囲を述べている。

第6章においては、素波数が少ないという前提のもとに、素波個々の到来方向を推定する手法を示している。一つは数理計画法を適用したL1ノルムによる手法であり、他方は従来手法の代表例と言えるSAGE法である。また、L1ノルムによる手法の推定方向をSAGE法の初期値とすることで結果が改善される場合があり、性質の異なる2つの手法を適切に組み合わせることにより総合的な推定精度の向上が可能であることを示している。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果を要約し、今後の課題について述べている。

これを要するに、著者は、円形アレーアンテナを用いたコヒーレント多重波到来方向推定について独立成分分析法適用時の特性を解析するなど新知見を得たものであり、無線工学、および、アレー信号処理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。