

博士学位論文審査要旨

2008年9月9日

論文題目： Direction of Arrival Estimation Using Hexagonal-Array Signal Processing

学位申請者： Eddy Taillefer

審査委員：

主査： 同志社大学工学研究科 教授 渡辺 陽一郎
副査： 豊橋技術科学大学情報工学系 教授 大平 孝
副査： 同志社大学工学研究科 准教授 程 俊

要 旨：

本論文は、六角形アレーアンテナによる電波到来方向推定に関する研究成果をまとめたものである。この電波到来方向推定法は、全方位到来方向推定可能、高精度、高速処理可能であり、複数の電波到来方向を同時に推定できる。さらに、提案法を受信系統1系統の小型アレーアンテナであるエスパアンテナに適用し、その有効性を実証した。

電波到来方向推定法として MUSIC (Multiple Signal Classification) 法や ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) 法が知られている。ESPRIT 法は高精度、高速処理可能である一方、全方位到来方向推定ができなく、かつ推定可能な到来電波の数が同一形状で平行不変性を持つサブアレーの素子数に制限されるという欠点がある。MUSIC 法は、全方位到来方向推定が可能であるが、高精度推定には、空間サーチに要する演算量が膨大になるという欠点がある。

本研究は、全方位到来方向推定可能、高精度、高速処理可能であり、アレー素子数より1少ない数の電波到来方向を同時に推定する方法を提案している。六角形アレーアンテナの6方向対称性に着目し、平行移動不変性を持つ複数個のサブアレー対を抽出する。これらのサブアレー対にそれぞれ ESPRIT 法を適用し、各サブアレー対から推定された角度から、全サブアレー対の推定角度の候補群が得られる。候補群中の推定角度の数はサブアレーの素子数より大きくなり、さらに、複数個のサブアレー対の平行移動方向が60度ずつ異なるため、候補群中の候補角度が360度の全方位までカバーできる。新たに定義した選択関数を最大にする、という選択規範に従い、推定角度候補群の中から逐次に到来角度の推定値を取り出す。

さらに、一つの受信系統しか持たないエスパアンテナを用いて高精度かつ低演算量の全方位到来方向推定法を提案している。これは、アレーアンテナに対する電波到来方向推定法に新たに考案したリアクタンスドメイン信号処理法を付加した推定法である。7素子エスパアンテナに対する計算機シミュレーションにより、提案法はこのエスパアンテナの到来方向推定精度の理論限界に非常に近い推定性能を示すことを確認し、電波暗室での実験で、全方位の到来方向推定が可能であることを明らかにした。

よって、本論文は、博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2008年9月9日

論文題目: Direction of Arrival Estimation Using Hexagonal-Array Signal Processing

学位申請者: Eddy Taillefer

審査委員:

主査: 工学研究科 教授 渡辺 陽一郎

副査: 豊橋技術科学大学情報工学系 教授 大平 孝

副査: 工学研究科 准教授 程 俊

要 旨:

本論文提出者は、社会人特別選抜入学試験に合格し、2006年4月より本学大学院工学研究科知識工学専攻博士後期課程に在籍し、各年度において優れた研究成果を挙げている。英語と日本語の語学試験に合格している。

本論文の主たる内容は、IEEE Transactions on Antennas and Propagation (3編)、電子情報通信学会論文誌 (1編) に掲載され、また IEEE Transactions on Signal Processing (1編) に掲載されることが決まっている。Handbook on Advancements in Smart Antenna Technologies for Wireless Networks に分担執筆している。これらの業績により十分な評価を得ている。

2008年8月22日午後3時より約1時間50分にわたって提出論文に関する学術講演会(博士論文公聴会)が開催され、種々の質疑討論が行われたが、論文提出者の説明により十分な理解が得られた。

さらに、講演会終了後、審査委員により論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、十分な学力を有することが確認できた。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士学位論文要旨

論文題目：Direction of Arrival Estimation Using Hexagonal-Array Signal Processing

氏名：Eddy Taillefer

要旨：

本論文は、アレーアンテナによる電波到来方向推定に関する信号処理の研究成果をまとめたものである。この電波到来方向推定法は、六角形アレーアンテナを用いて、高精度、高速処理可能、複数の電波到来方向が推定可能、かつ全方位推定が可能である。さらに、提案法を小型アレーアンテナに適用し、その性能を実証した。

電波到来方向推定とは、電波発信源から発信され電波を受信し、信号処理によってその電波がどの方向から発信されているかを特定することである。通常、アレーアンテナを用いて電波到来方向を推定する。アレーアンテナは、空間上一定の形状で配列した複数のアンテナ素子から構成される。各アンテナ素子は空間上配置された位置が異なることより各素子の受信信号の位相差が生じる。これを利用して、各アンテナ素子からの受信信号を観測し、信号処理による到来波の角度などの電波伝播パラメータを知ることができる。電波到来方向推定は、移動通信や室内無線通信（無線LAN）などにおいて電波伝搬構造を詳細に把握することで、無線移動通信の効率を向上させることができる。また、不法電波の発信源を特定することができる。さらに、環境モニタリングや電波天文学などのへの応用が考えられる。

電波到来方向推定の研究は数十年に渡ってなされている。その内、部分空間分離に基づく MUSIC (Multiple Signal Classification)法や ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)法が高精度の到来方向推定ができ、現在、最も注目を浴びている。部分空間分離とは、アレーアンテナ素子から観測した受信信号の相関行列を作成し、その相関行列の固有値展開により受信信号を信号部分空間と雑音部分空間に分離することである。MUSIC法では電波の到来方向から構成された信号部分空間が雑音部分空間と直交するという性質に基づきスペクトラム関数を計算し、その関数の極大値を空間サーチすることで到来波の推定角を求める。ただし、高精度の推定値を求めるために、空間サーチを行うときの角度刻みを細かく設定する必要があるため、演算量が膨大になってしまう。

ESPRIT法は、MUSIC法の弱点を克服し高精度、低計算量である電波到来方向推定法である。ESPRIT法では、アレーアンテナにある同一形状で平行不変性を持つ二つのサブアレーに着目し、電波伝搬によるサブアレー対の間に生じる位相回転を推定して到来角度を導く。具体的には、アレー応答行列からサブアレーの対応成分を抽出し、平行移動による位相回転を補正し、回転不変方程式が得られる。信号部分空間において、この方程式を解くと各電波の位相回転を得る。よって、電波の到来角度を定式化によって求めることができる。MUSIC法と比較して、ESPRIT法は空間サーチを行わないので、演算量が大幅減少し、到来方向をより高速に推定することが可能となる。

しかし、ESPRIT法は次に示す二つの欠点がある。第一に、電波が角度 θ 、または、 $360^\circ - \theta$ から到来するとき、推定角度の値は同じである。つまり、360度の全方位で推

定できない。第二に、推定可能な到来波の数がサブアレーの素子数以下である。これらの問題を解決することが、本研究の一つ目の目的である。

本研究の二つ目の目的は、無線移動端末に高精度かつ低演算量の全方位電波到来方向探知機能を持たせることである。従来のアレーアンテナは、各アンテナ素子の受信信号を観測するため、各素子に一つずつ受信システムが必要である。よって、アレーアンテナは、大型で消費電力が大きい。そのため、この種のアレーアンテナを無線移動端末に適用するのが困難である。これに対して、受信システム1システムで素子間信号の合成が空間で行える小型アレーアンテナ——エスパアンテナ (ESPAR : Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) ——が提案されている。エスパアンテナは、小型低消費電力アレーアンテナの実現の観点から有用である反面、その信号処理に当たって、すべての素子の受信信号を得ることができないため、従来の電波到来方向推定法に適用することができない。本研究では、第4章で提案する高精度かつ低演算量の全方位到来推定法をエスパアンテナのような小型アレーアンテナに適用し、無線移動端末にも電波到来方向を推定できることを明らかにする。

本論文は、6章から構成される。

第1章は、論文の導入である。電波到来方向推定に関する研究の動機および従来方法の問題点を述べ、それらの問題を克服するための解決手法を提案する。さらに、本論文での提案法の新規性および有効性について概括する。

第2章では、アレーアンテナによる信号処理の基礎について述べる。アレーアンテナ信号処理のため、アレーアンテナによる電波受信の解析モデルを確立する。さまざまな素子配置のアレーアンテナ形状について、アレーファクタ、ステアリングベクトル、アレーの開口などアレーアンテナ信号処理の基本パラメータを定義する。

第3章では、従来の電波到来方向推定法について述べる。まず、電波推定の部分空間分離のため、アレーアンテナ受信信号の相関行列について述べる。次に、古典的なさまざまな到来方向推定方法を概括し、各推定方法の演算量を比較するとともに、統計的な推定性能としてのCRB (Cramer-Rao Bound) 限界も比較する。最後に、それらの電波到来推定法の問題点を指摘する。

第4章と第5章は本論文の中心になる部分である。

アレーアンテナを用いた電波到来方向推定 ESPRIT 法が高精度、高速処理である一方、全方位推定不可かつ推定電波の数がサブアレーの素子数に制限されるという欠点がある。第4章では、これらの問題を解決するため、全方位から到来する多数の電波の到来方向を高精度かつ高速に推定する方法を提案する。

全方位電波到来方向を推定するため、素子が一直線状で配置する1次元のリニアアレーでなく、2次元のアレーアンテナを用いる必要である。全方位推定するため、60度ずつ6方向対称性を持つ六角形アレーのような2次元アレーアンテナを利用する。本研究では、六角形アレーアンテナの6方向対称性に着目し、その対称性により、平行移動不変性を持つ6個のサブアレー対を抽出する。従来の ESPRIT 法では一つのサブアレー対の平行移動不変性を利用し、180度範囲内でサブアレーの素子数以下の

推定角度が得られる。それに対して、本研究では、6個のサブアレー対にそれぞれ ESPRIT 法を適用し、各サブアレー対からの推定された角度から、全サブアレー対の推定角度の候補群を得られる。候補群中の推定角度の数は、サブアレーの素子数より大きくなるのが可能であり、さらに、6個のサブアレー対の平行移動方向が60度ずつ異なるため、候補群中の候補角度が360度の全方位までカバーできる。なお、ESPRIT 法の替りに全ての演算が実数行列で行える Unitary-ESPRIT 法を採用することにより、演算量を更に少なくすることができる。

推定角候補群の中に推定角が存在するが、その角度をどのように選択するかが、本研究の中心課題です。本研究では、MUSIC スペクトラム関数に基づく選択関数を最大にする、という選択規範を提案し、その規範により、推定角候補群の中から逐次に到来角度の推定値を取り出すことで、到来方向を推定する。提案した選択関数は、角度の関数で、MUSIC スペクトラム及びアレーアンテナの出力電力に比例する。その角度は、電波到来角度と一致するとき、信号部分空間と雑音部分空間とが直交するので、MUSIC スペクトラムは最大になり、また、アレーアンテナの出力電力が最大になる。よって選択関数が最大になる。なお、アレーアンテナの出力電力の計算は、すでに推定した角度の信号成分を取り除く、逐次に行う。計算機シミュレーションの結果、M素子6角形アレーアンテナを用いて全方位 M-1 波の到来方向推定ができることを確認し、提案法の有効性を明らかにした。

第5章では、小型アレーアンテナを用いて高精度かつ低演算量の全方位到来推定法を提案する。使用する小型アンテナはエスパアンテナである。7素子のエスパアンテナは中心に給電素子があり、その周りに無給電素子が等間隔で配置され、正六角形形状のアレーアンテナである。従来のアレーアンテナと異なり、給電素子が唯一であるため、アンテナに接続する受信システムが従来の単一アンテナの受信システムと同様で構成することが可能になる。また、無給電素子に装荷するバラクタダイオードへDC制御電圧を変化させることにより、各素子に受信した信号間の電磁結合が変わる。よって、小型低消費電力アレーアンテナが実現できる。しかし、エスパアンテナでは、すべての素子の受信信号を得ることができないため、従来のアレーアンテナ信号処理手法をそのまま適用することができない。例えば、部分空間分離に基づく電波到来方向推定 ESPRIT 法の適用に必要な各素子の受信信号間の相関行列を直接計算することができない。

本研究では、リアクタンスドメイン (RD) 信号処理手法を提案し、RD 相関行列を生成することが可能となる。これは、送信側から同一信号系列を複数回送信し、互いに異なる複数の制御電圧ベクトルを切り換えて受信信号を得る方法である。その受信信号のベクトルから RD 相関行列を計算することができる。よって、第4章で提案した方法を RD 相関行列に適用することにより、エスパアンテナによって電波到来方向を推定することが可能である。計算機シミュレーションの結果、提案法は、エスパアンテナにおける到来方向推定精度の理論限界に非常に近い推定性能を示すことを確認した。さらに、電波暗室での実験で、到来角度推定可能であることを明らかにした。

また、第5章では、さらに計算量が少ない PPCC (Power Pattern Cross Correlation) 簡易到来方向推定法を提案する。あらかじめ複数アンテナ指向性放射パターンを用意しておく。電波到来方向推定する際、これらの複数パターンを切り替えて受信し、受信

機で受信電力を測定する。得られた受信電力ベクトルは、あらかじめ角度刻みで保存された複数パターン電力ベクトルとの相関を求め、相関最大のときの角度を推定角度とする。この推定法は、受信信号の電力と相関のみで計算するから、計算量は最も少ない。計算機シミュレーション及び実験でPPCC法の有効性を確認した。

第6章では、論文をまとめ、残された課題を述べる。