

アレイ信号処理およびレーダ信号処理への ニューラルネットワークの応用に関する研究

学位論文内容の要旨

アレイアンテナを用いた到来方向推定の高分解能化、レーダ信号処理におけるスペクトル推定の高分解能化などは、無線通信におけるアンテナ指向性制御、電磁環境計測、レーダ利用のリモートセンシングなどの応用分野に益するところが大きい。

これらのアレイ信号処理やレーダ信号処理に用いられるスペクトル推定手法として一般的にはフーリエ変換法が使われるが、このフーリエ変換法の分解能を超えて高分解能にスペクトルを推定する計算方法が提案されてきた。その高分解能スペクトル推定法としては、ML (Maximum Likelihood) 法、MV (Minimum Variance) 法、ME (Maximum Entropy) 法、MUSIC (Multiple Signal Classification) 法、MN (Minimum Norm) 法[※]、ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) 法など数々の方法がある。一般的に、これらの高分解能スペクトル推定法は、逆行列変換、固有値解析などの複雑かつ多量の演算を必要としているため、2次元アレイなどの様にセンサー数が多くなる場合やサンプリング数が増えてくると演算量の増大とアルゴリズムの複雑さが問題となってくる。

本研究では、神経回路網における高度情報処理機能をモデル化したニューラルネットワークの集団並列計算機能に着目し、高分解能スペクトル推定問題に適用する方法についてその可能性と特性について計算機シミュレーションを用いて検討し、加えていくつかの応答例を示している。

まず、本研究で用いる Hopfield 型ニューラルネットワークの最適化の動作原理について述べた後、多重波到来環境での到来方向推定問題への適用方法を検討した。具体的には、多重波到来環境での到来方向推定問題を最適化問題として定式化し、その最適化問題に対して Hopfield 型ニューラルネットワークを適合させた時のニューロンの入出力関数、結合コンダクタンス行列、外部入力電流といったネットワーク構成要素を求めた。この要素で構成されるニューラルネットワークを動作させ、ネットワークのエネルギーが極小状態に収束していくにつれて、方向角やスペクトル位置に対応するように設定したニューロン出力のうち、所望のニューロンにのみ出力があり他のニューロン出力は0になるというように変化していくことが確認された。これによって、Hopfield 型ニューラルネットワークのスペクトル推定問題への本適用手法がうまく動作したことになる。

次に、本適用手法の特性について、アレイアンテナを用いて2波到来環境において到来方

向推定を行なう問題を対象として、計算機シミュレーションにより検証した。

最初に、収束特性についてネットワークのエネルギー変化とニューロン出力としての推定スペクトルパターンの変化とを対比して考察し、エネルギーが段階的に変化する時にニューロン出力のパターンも変化することを示した。次に、分解能について検証した。2波到来環境において2波間の角度間隔を変化させていき、どの角度差まで分解可能であるかを調べることにより、本適用手法は位相走査によるビーム形成 (Conventional Beamforming: 空間フーリエ変換に相当) で分解できる角度差の1/3倍程度まで分解できることを示した。次いで、低SN比環境下での特性についてシミュレーションを行なった結果、MUSIC法やCapon法などの高分解能スペクトル推定法において分解不可能な場合においても、到来方向が分離できる場合があることを示した。さらに、2波間に相関がある場合については、MUSIC法ではそのアルゴリズムから空間平均法などを導入しないと適用不可であるが、本手法においては無相関の場合と同等に2波を分離できることを示した。

これらの基本的な特性の評価をもとに、具体的なレーダ信号処理への応用も試みた。

最初は、ステップ周波数レーダへの応用ということで、光集積回路や微小光学部品などの診断可能を可能にする、周波数変化がTHzオーダーとなるレーザ発振器を用いたステップ周波数レーザレーダにおいて、距離特性を求める信号処理部分にニューラルネットワークのスペクトル推定法を導入した。これについては空間光学実験系とファイバ型光学実験系の2種類の系で実験を行ない、各種測定対象物からの受信信号を本手法にて処理した。その結果、従来の一般的な解析法であるフーリエ変換 (FFT) を用いた場合は分解することのできない、光ファイバ断面のコアクラッド構造、複屈折なども計測できることを示した。

次に、ドップラレーダへの応用を考え、FMCW方式のドップラレーダの一種である短波海洋レーダのドップラスペクトル推定部分への応用を試みた。短波海洋レーダは海面に電波を照射させて海面でのBragg散乱による後方散乱波を受信し、そのドップラスペクトルから表層流の流向流速を計測する。得られる速度情報としてのドップラスペクトルはレーダの照射領域内で平均化されたものになっているが、搬送波周波数が短波帯であることからアンテナ開口長が大きくなるため角度分解能をむやみに高くすることができず、距離方向についても周波数帯域幅が限られるため、照射領域は一般的にkmオーダーになる。この照射領域の大きさよりも小さいサイズの流速場変動が存在する場合、ドップラスペクトルに複数の成分が表れると考えられるが、その流速成分差が小さいと一般的なフーリエ変換では分解不可能になるが、本手法を適用することにより分離可能であることを、実データの処理結果により示した。

以上、Hopfield型ニューラルネットワークのスペクトル推定法への適用について検討し、アレイ信号処理およびレーダ信号処理への応用について計算機シミュレーションと実際のデータへの適用によりその特性の検証を行なった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 青 木 由 直
副 査 教 授 栃 内 香 次
副 査 教 授 山 本 強

学 位 論 文 題 名

アレイ信号処理およびレーダ信号処理への ニューラルネットワークの応用に関する研究

本論文は、アンテナ指向性制御、電磁環境計測、レーダ利用のリモートセンシングなどへの応用を目的としたアレイアンテナを用いた到来方向推定の高分解能化やレーダ信号処理におけるスペクトル推定の高分解能化技法の開発に関するものである。アレイ信号処理やレーダ信号処理に用いられるスペクトル推定手法として一般的にはフーリエ変換法が用いられる。一方、このフーリエ変換法の分解能を超えて高分解能にスペクトルを推定する計算方法が提案されて来ており、ML (Maximum Likelihood)法、MV (Minimum Variance)法、ME (Maximum Entropy)法など数々の方法がある。一般的に、これらの高分解能スペクトル推定法は、逆行列変換、固有値解析などの複雑かつ多量の演算を必要としているため、2次元アレイなどの様にセンサー数が多くなる場合やサンプリング数が増えてくると、演算量の増大とアルゴリズムの複雑さが問題となってくる。

本研究では、神経回路網における高度情報処理機能をモデル化したニューラルネットワークの集団並列計算機能に着目し、高分解能スペクトル推定問題に適用する方法についてその可能性と特性について計算機シミュレーションにより検討し、実際的な問題への適用について研究を行っている。

第1章は序論であり、本論文の研究が行われるに至った背景と目的を述べ、全体の概要と構成を明かにしている。

第2章では、本研究で用いる Hopfield 型ニューラルネットワークの最適化の動作原理について述べ、多重波到来環境での到来方向推定問題への適用方法を検討している。具体的には、多重波到来環境での到来方向推定問題を最適化問題として定式化し、その最適化問題に対して Hopfield 型ニューラルネットワークを適合させた時のニューロンの入出力関数、結合コンダクタンス行列、外部入力電流といったネットワーク構成要素を求めた。

第3章では、第2章で述べた原理に従い、本研究で開発した手法の多重波到来環境における方向推定問題への適用性について、コンピュータシミュレーションにより検証した。検証として、低S/N比状況下および互いに相関を持つ信号が入射した場合などについて、その能

力と他の到来方向推定手法との比較結果について考察を行っている。さらに、アレイアンテナを用いて2波到来環境において到来方向推定を行なう問題を対象として、計算機シミュレーションにより検証を行った。2波到来環境において2波間の角度間隔を変化させていき、どの角度差まで分解可能であるかを調べることにより、本開発手法は位相走査によるビーム形成 (Conventional Beamforming: 空間フーリエ変換に相当) で分解できる角度差の1/3倍程度まで分解できることを示した。

第4章では、第2章、第3章で得られた結果を実際のレーダ信号へ適用するための研究を行っている。まず、ステップ周波数レーダへの応用として、光集積回路や微小光学部品などの診断可能を可能にする、周波数変化がTHzオーダーとなるレーザ発振器を用いたステップ周波数レーザレーダにおいて、距離特性を求める信号処理部分にニューラルネットワークのスペクトル推定法を導入した。これについては空間光学実験系とファイバ型光学実験系の2種類の系で実験を行ない、各種測定対象物からの受信信号を本手法で処理した。その結果、従来の一般的な解析法であるフーリエ変換 (FFT) を用いた場合は分解することのできない、光ファイバ断面のコアクラッド構造、複屈折なども計測できることを示した。

次に、ドップラレーダへの応用を考え、FMCW方式のドップラレーダの一種である短波海洋レーダのドップラスペクトル推定部分への応用を試みた。短波海洋レーダは海面に電波を照射させて海面でのBragg散乱による後方散乱波を受信し、そのドップラスペクトルから表層流の流向、流速を計測する。その流速成分差が小さいと一般的なフーリエ変換では分解不可能になる場合でも、本研究で開発した手法を適用することにより分離可能であることを実データの処理結果により示した。

第5章は結論であり、本研究の総括を行っている。

このように著者は本論文において、電波の到来方向推定の高分解能化やレーダ信号処理におけるスペクトル推定の高分解能化技法に関して新しい技法を開発し、実際に光周波数のステップ周波数レーダや短波海洋レーダの信号処理に適用できる点を明らかにしている。

これを要するに、著者はレーダ信号処理の分野において新知見を得ており、信号処理工学および情報メディア工学に貢献するところが大なるものがある。

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。