

複数アンテナを用いた広帯域デジタル無線通信における 高度受信信号処理に関する研究

学位論文内容の要旨

近年の、携帯電話に代表される無線通信の技術革新および一般ユーザへの浸透は目覚ましいものがある。特に最近では、音声通話のみならず、携帯端末を用いてインターネットにアクセスするユーザの割合が急激に増加しており、大容量のマルチメディアコンテンツをストレス無く伝送できるような大容量無線通信技術への要求が高まっている。

無線通信においてシステム周波数を広げることなく大容量伝送を実現できる方式として、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムの検討が盛んに行われている。MIMO システムとは、広義には、複数の信号入出力端を持つシステム全般を指し、狭義には、単一の送信機および受信機が複数のアンテナを装備し、同一時刻、同一周波数に複数の信号を同時に送信するシステムを意味する。1990 年代後半に MIMO 伝送路の通信路容量は送受信アンテナの次数に比例して増大することが証明されて以来、世界中で活発な研究開発が進められている。

MIMO システムにおける信号伝送形態の一つに、MIMO 空間多重が挙げられる。これは、複数の送信アンテナから異なる情報を並列伝送することで大容量伝送を実現する手法である。MIMO 空間多重では、並列伝送された信号が互いに干渉となって受信機に到来する。そのため、受信機において各信号を分離・検出する必要がある。MIMO 空間多重の伝送性能は信号分離方式によって大きく左右されることとなる。MIMO 空間多重における代表的な信号分離方式に空間フィルタと最尤判定法 (Maximum-Likelihood Detection: MLD) が挙げられる。空間フィルタは、所望の信号成分のみを抽出し、他の信号成分を干渉とみなして除去するような線形フィルタバンクを用いて並列伝送された各ストリームを分離する方式である。MLD は、受信信号のレプリカを取りうる全ての送信シンボルの組み合わせに対して作成し、受信信号と比較した上で最も確からしいものを送信されているものとして判定する方式である。MLD は理論的に最適な信号分離性能を有するものの、MIMO 空間多重でターゲットとするような大容量伝送時には、考慮しなければならないレプリカの組み合わせ数が増加するため、膨大な処理量を必要とする欠点があった。

本論文の目的は、MIMO 空間多重を用いて大容量伝送を実現するために要求される高性能受信信号処理技術の確立とその有効性を示すことにある。大容量伝送を実現するために多値変調と MIMO 空間多重を併用した場合、高い受信感度特性を有する受信機の実現が必須である。本論文では、理論的に最適な信号分離法である MLD に着目し、MLD が有する最高の性能を少ない演算量で実現できる受信方式の検討を行う。加えて、復調アルゴリズムを動作させるために必要な無線伝送路を推定する処理を高精度に実現する方式に関する検討も行う。本論文は、以下の 6 章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究に至る社会的背景および研究動向について述べた上で、本論文の目的と意義を明らかにする。また、論文の全体構成について述べている。

第2章では、MIMO 伝送路および MIMO 空間多重の基本事項を説明する。ここで、MIMO 伝送路は MISO (Multiple-Input Single-Output) や SIMO (Single-Input Multiple-Output) の構成を上回る通信路容量を有することを説明する。更に、具体的な MIMO システムにおける送受信方式として MIMO 空間多重を説明し、MIMO 空間多重における基本的な信号分離方式である、空間フィルタおよび MLD の処理内容と性質をまとめる。

第3章では、MLD の有する高い信号分離性能を維持したまま、その演算量を削減する演算量削減型 MLD について、特に、最も確からしいシンボルを検出する際の演算量削減の観点から検討を行っている。本論文では、理論的に MLD と等価な性能を達成できる SD (Sphere Decoding) に着目し、SD の演算量を決定付けるパラメータである超球の半径を複数の異なる基準から適応的に選択する手法を提案している。評価の結果、従来方式と比較して提案方式は通信環境に依らず大きな処理量削減効果が得られることを示している。本章では、更に、SD を同一チャネル干渉除去に応用する手法を提案し、SD はシングルユーザ環境における MIMO 空間多重用の信号分離のみならず、MIMO システムにおける干渉キャンセルにも適用可能であることを明らかにしている。その上で、干渉は不要な信号であることに着目し、所望信号と干渉信号を全て包含する受信信号モデルから、干渉信号を削除した低次元モデルを再構築することで、大幅な演算量削減を実現可能であることを示している。

第4章では、演算量削減型 MLD と軟入力復号器とを組み合わせる誤り訂正復号を行う場合の課題である、復調器における軟判定計算方法の検討を行っている。演算量削減型 MLD は、演算量削減の過程において、軟判定計算に必要な尤度情報をも削減してしまい、精度の高い軟判定を生成することができないという問題点があった。これに対して、MIMO 空間多重の信号分離結果に基づいて、空間フィルタと最尤判定法の処理を組み合わせた簡易な手法で必要な尤度を推定する方式を提案している。提案方式を用いることで、演算量削減型 MLD を用いた場合でも精度の高い軟判定を生成することが可能になり、その結果高い復号性能を享受できることを示している。また、提案方式は演算量削減型 MLD の構成に依らず適用可能である、汎用的な方式であることを説明している。

第5章では、MIMO 空間多重における伝送路推定法の検討を行っている。MIMO 空間多重では、復調に先立って推定しなければならない無線伝送路応答の数がアンテナ構成に比例して増加してしまう。特に、シングルキャリア方式による広帯域伝送を考えると、複数シンボルに渡る遅延分散を有する周波数選択性フェージングが生じるため、更に遅延シンボル数倍の伝送路係数を推定しなければならない。このような多数の伝送路係数を干渉存在下で高精度に推定するために、伝送路推定のパイロット信号のみならずデータ信号をも利用してパラメータ推定を行う手法を検討する。その上で、データ信号を用いた伝送路推定では、ストリーム間干渉キャンセルを導入した、ストリーム毎の逐次伝送路推定を行う構成にすることで、伝送路推定誤差がない場合に漸近する高い復号性能を実現できることを示している。

第6章は結論であり、本論文の内容および得られた知見を要約している。更に、今後の研究課題を述べている。

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
副査	准教授	大鐘武雄

学位論文題名

複数アンテナを用いた広帯域デジタル無線通信における 高度受信信号処理に関する研究

近年、携帯端末を用いたインターネットアクセスが急増し、大容量のマルチメディアコンテンツをストレス無く伝送できるような大容量無線通信技術への要求が高まっている。その解決策として最も注目されている技術が、送信機および受信機が複数のアンテナを装備した MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムである。1990 年代後半に MIMO 伝送路の通信路容量が送受信アンテナの数に比例して増大することが証明されて以来、世界中で活発な研究開発が進められている。

MIMO システムにおける信号伝送形態の一つに、MIMO 空間多重が挙げられる。これは、複数の送信アンテナから異なる情報を並列伝送することで大容量伝送を実現する手法である。MIMO 空間多重では、並列伝送された信号が互いに干渉となって受信機に到来するため、受信機において各信号を分離・検出する必要がある。このとき、MIMO 空間多重の伝送性能は信号分離方式によって大きく左右される。MIMO 空間多重における代表的な信号分離方式としては、空間フィルタと最尤判定法 (Maximum-Likelihood Detection: MLD) が挙げられる。空間フィルタは、他の信号成分を干渉とみなして除去し、所望の信号成分のみを抽出する線形フィルタバンクを用いて、並列伝送された各ストリームを分離する方式である。一方、MLD は、取り得る全ての送信シンボルの組み合わせに対して受信信号のレプリカを作成し、受信信号と比較した上で最も確からしいものを送信信号として判定する方式である。MLD は理論的に最適な信号分離性能を有するものの、MIMO 空間多重で対象とする大容量伝送時には、レプリカの組み合わせ数が指数的に増加するため、膨大な処理量を必要とする欠点があった。

本論文の目的は、MIMO 空間多重を用いて大容量伝送を実現するために要求される高性能な受信信号処理技術の確立とその有効性を示すことにある。ここでは、理論的に MLD と等価な性能を達成できる SD (Sphere Decoding) に着目し、SD の演算量を決定付けるパラメータである超球の半

径を複数の異なる基準から適応的に選択する手法を提案した。評価の結果、提案方式は通信環境によらず大きな処理量削減効果が得られることを明らかにしている。また、このような演算量削減型 MLD を軟入力復号器と組み合わせて誤り訂正復号を行う場合、演算量削減の過程において軟判定計算に必要な尤度情報をも削減してしまい、精度の高い軟判定を生成することができないという問題点があった。これに対して、MIMO 空間多重の信号分離結果に基づいて、空間フィルタと最尤判定法の処理を組み合わせた簡易な手法で必要な尤度を推定する方式を提案した。この手法により、演算量削減型 MLD を用いた場合でも精度の高い軟判定を生成することが可能になり、その結果高い復号性能を享受できることを明らかにしている。さらに、これらのアルゴリズムを動作させるために必要な無線伝送路を推定する処理を高精度に実現する方式も新たに開発している。本論文は、以下の 6 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、本研究に至る社会的背景および研究動向について述べた上で、本論文の目的と意義を明らかにしている。

第 2 章では、MIMO 伝送路および MIMO 空間多重の概要として、MIMO 通信路容量を導出し、MIMO 空間多重における基本的な信号分離方式である空間フィルタおよび MLD について述べる。

第 3 章では、MLD の有する高い信号分離性能を維持したままその演算量を削減する演算量削減型 MLD として SD (Sphere Decoding) に着目し、SD の演算量削減手法について提案するとともにその特性評価を行っている。

第 4 章では、演算量削減型 MLD における軟判定計算方法の提案を行っている。さらに、本手法が演算量削減型 MLD を用いた場合でも精度の高い軟判定を生成可能であること、また、演算量削減型 MLD の構成に依らず適用可能な汎用的方式であることを明らかにしている。

第 5 章では、MIMO 空間多重において、多数の伝送路係数を干渉存在下で高精度に推定する逐次伝送路推定手法を提案し、伝送路推定誤差がない場合に漸近する高い復号性能を実現できることを示している。

第 6 章は結論であり、本論文の内容および得られた知見を要約している。

これを要するに、著者は、大容量伝送を実現できる MIMO システムにおいて高性能な受信信号処理について提案するとともに、高い復号処理を低演算量で達成できることを明らかにしたものであり、無線通信工学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。