

学位論文題名

Reduced Complexity Detection Algorithms for
MIMO Spatial Multiplexing Systems

(MIMO 空間多重システムにおける演算量削減信号検出技術に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年、信号処理や集積回路技術の飛躍的な進歩および世界規模での継続的な標準化活動によって端末が小型化するとともに、利用料金は低下し、無線通信サービスの利用者数は爆発的に増加してきた。その利便性から無線通信サービスはさまざまな国と地域で有線通信サービスの代替手段となりつつある。また、音声通話サービスの飽和を受け、無線通信サービスも有線通信と同じようにデータ通信への標準整備が急速に進められている。その代表的なものとして WLAN や WMAN が挙げられる。

このように、より高速でより高品質な無線通信サービスが求められ続けているが、有線と違い、無線通信の場合には、周波数の枯渇が大きな問題であることから、周波数の利用効率を高めるための研究が盛んに行なわれている。そこで、送信機側、及び、受信機側の双方に複数のアンテナを設置した MIMO 通信が注目をあびている。MIMO 空間多重システムでは、所要周波数帯域幅を増大せずに、送信側の各アンテナから異なる情報信号を送信し、受信側でこれらの信号を分離することができるため、送信アンテナ数に比例した伝送速度の向上が可能となる。

MIMO 空間多重システムの受信特性は受信側で用いる信号検出手法によって大きく異なる。最適検出法 MLD は最も良い誤り率特性を実現する一方、その所要演算量は送信ストリーム数の増加とともに指数的に増大してしまう。従って、MIMO 空間多重システムにおいて良好な受信特性を得るには膨大な信号処理量が必要とされ、その結果、受信機の経済的な実現は非常に困難になる。このように MIMO 空間多重システムは周波数利用効率を高めるために有効であるが、その利点を十分生かした実用化を達成するためには演算量を削減した受信側信号検出技術の確立が重要となる。

本論文では MIMO 空間多重システムの実用化という観点から経済的な受信機を実現するため、演算量を削減した効率的な受信側信号検出技術についてさまざまな検討を行った。第 1 章は序論であり、本研究の背景、目的および検討課題について述べている。

第 2 章では、本研究で用いるシステムモデルについて述べている。まず、MIMO 利得の観点から MIMO システムの特徴を紹介し、次に、ターゲットシステムである MIMO 空間多重システムを紹介している。更に、検討課題である MIMO 空間多重システムにおける信号

検出技術の主な従来方式:最適検出法, 及び, 線形フィルタリング法をそれぞれ述べ, それらの問題点を指摘した.

第3章から第6章までは, MIMO 空間多重システムにおける演算量削減信号検出技術に関して検討を行っている. まず, 第3章においては, ヌリングキャンセル判定帰還型信号検出法のひとつである V-BLAST アルゴリズムについて述べている. V-BLAST に用いる信号検出順番付け技術は非常に有効であり, それを実装するには複数回の逆行列演算が必要で演算量が大きくなる. そこで, 本論文は V-BLAST の初期処理, 及び, 反復処理の二つの段階のそれぞれにおいて逆行列計算用の高速な再帰アルゴリズムを提案し, 演算量について理論計算および計算機シミュレーションの両方で提案技術の有効性を明らかにした.

第4章では, QR 分解を用いて後退代入判定帰還型信号検出法を述べ, ヌリングキャンセル判定帰還型信号検出法と等価であることを論じている. QR 分解による信号検出においても信号検出の順番付けが誤り特性に大きく影響する. そこで, 本論文は行列式近似計算手法による新たな順番付け方法を提案した. 更に, QR 分解法に用いる前進, 後退フィルタを生成するために必要な演算量を削減するため, Cholesky 分解を用いた CQRD アルゴリズムも提案した. 演算量およびビット誤り率の両方について計算機シミュレーションを通して, 提案技術の優位性を示した.

第5章では, 第3章および第4章で述べた2種類の判定帰還型信号検出技術を比較しながら述べた. ヌリングキャンセル判定帰還型手法の場合は初期処理の効率が良く, 後退代入判定帰還型手法の場合は反復信号検出処理の演算量が低いことを指摘している. そこで, 本論文は第3章と第4章で提案した手法を組み合わせることによって, 2つの混合判定帰還型信号検出技術を提案した. 計算機シミュレーションを通して, 提案技術は演算量およびビット誤り率の両方について従来の判定帰還型信号検出手法の長所を持ち合わせていることを明らかにした.

第6章では, 判定帰還型信号検出技術より更に良い特性が得られるツリー探索信号検出法について述べている. まず, 第2章で述べた最適検出法をツリー探索の観点から見直し, 更に代表的な従来のツリー探索信号検出技術である M アルゴリズムおよびスタックアルゴリズムについても論じている. 従来のツリー探索信号検出法では, 最尤あるいは近似最尤な結果を得るには膨大な数の信号点候補を探索しなければならない問題点がある. そこで, 本論文は探索を効率良く行うために探索用順番付け手法 PIB および PIS を提案した. 更に, 探索用順番付け手法 PIB および PIS に整合した効率的なツリー探索手法も提案した. 計算機シミュレーションを用いて所用演算量, 及び, ビット誤り率について従来技術と比較し, 提案ツリー探索信号検出技術の有効性を明らかにした.

第7章は結論であり, 本研究で得られた成果を要約している.

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

Reduced Complexity Detection Algorithms for MIMO Spatial Multiplexing Systems

(MIMO 空間多重システムにおける演算量削減信号検出技術に関する研究)

携帯電話や無線 LAN の普及から明らかなように、近年の無線通信技術の発展には著しいものがある。無線通信は有線通信と異なり、空間を伝送媒体とするため、大容量・高速伝送を実現する際に、周波数資源の枯渇が重大な問題となることから、高い周波数利用効率を有する伝送方式が求められている。このような背景のもとで、1990 年代の後半から、送信機と受信機の双方に複数のアンテナを設置した MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムと呼ばれる技術が登場し、多くの研究成果が発表され続けている。MIMO システムにおいて、各送信アンテナから、異なる信号系列を同一の時刻と周波数帯で送信することにより、送信アンテナ数に比例して伝送速度を高めることができる。これらの信号は互いに干渉となるため、受信側では、それらの分離検出を行うことになる。このような方式は空間多重と呼ばれている。

本論文は MIMO システムを用いた空間多重方式を実用化するために、演算量を削減した効率的な受信側信号検出技術について様々な検討を行ったものであり、全体は 7 章で構成されている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、目的、および、論文の構成について述べている。

第 2 章では、MIMO システムの概要を説明し、空間多重の概念が紹介されている。その後、信号検出について論じ、最適検出、および、準最適検出の長所と問題点が述べられている。

第 3 章では、各送信アンテナから空間多重伝送された信号を少ない演算量で分離検出するヌリング・キャンセル判定帰還法について論じている。再帰的検出法である BLAST (Bell Labs Layered Space-Time) アルゴリズムの初期処理と反復処理の 2 つの段階に、新たな行列演算手法を導入することによって、信号検出特性の劣化なく、演算量を従来の半分以

下にできることを明らかにしている。

第4章では、QR分解に基づく後代入判定帰還信号検出法について考察している。演算量を削減するため、行列式の近似計算による信号検出順序付けとCholesky分解に基づくQR分解が提案されている。更に、計算機シミュレーションにより、提案手法は演算量が少ないにもかかわらず、最適なBLASTアルゴリズムとほぼ同程度の誤り率を有することを示している。

第5章では、まず、ヌリング・キャンセルと後代入の観点から改めてBLASTアルゴリズムの考察を行っている。それに続いて、2種類の混合判定帰還型信号検出技術を提案している。これらの手法は再帰的な逆行行列演算と順序付けQR分解法を組み合わせたものであり、それらの長所が反映されている。更に、計算機シミュレーションの結果を用いて、演算量と誤り率に関して、これらの混合判定帰還型信号検出方式の利点を明らかにしている。

第6章では、ツリー探索に基づく近似最尤検出法の提案を行っている。まず、最適な最尤検出法をツリー探索の観点から見直しを行っている。それに続いて、代表的な従来のツリー探索信号検出技術であるMアルゴリズム、および、スタックアルゴリズムについて論じている。従来のツリー探索信号検出法では、最尤あるいは近似最尤な結果を得るには極めて多くの信号点候補を探索しなければならない問題がある。そこで、本章では、探索を効率良く行うために探索用順序付け手法PIB (Partial Inverse BLAST)、および、PIS (Partial Inverse Sorting)の提案を行っている。次に、これらのPIBとPISに整合した効率的なツリー探索手法も提案している。更に、計算機シミュレーションを用いて必要とされる演算量、および、誤り率について従来の手法と比較を行い、提案ツリー探索信号検出技術の有効性を明らかにしている。

第7章は結論であり、本論文の内容と成果を要約している。

これを要するに、著者は周波数利用効率を改善できるMIMO空間多重システムにおける演算量削減信号検出技術に関して重要な提案を行うとともに、その特性評価を行ったものであり、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。