

氏 名	こ い け と し あ き 小 池 俊 昭
学位(専攻分野)	博 士 (情 報 学)
学 位 記 番 号	情 博 第 180 号
学位授与の日付	平 成 17 年 9 月 26 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	情 報 学 研 究 科 通 信 情 報 シ ス テ ム 専 攻
学位論文題目	Space - Time - Frequency Signal Processing for Spectrum - Efficient Multiple - Antenna Wireless Transmission Systems (周波数利用効率に優れた複数アンテナ無線伝送システムのための空間時間 周波数信号処理)
論文調査委員	(主 査) 教 授 吉 田 進 教 授 酒 井 英 昭 教 授 佐 藤 亨

論 文 内 容 の 要 旨

複数の送受信アンテナを用いる MIMO (multiple-input multiple-output) 無線伝送システムは周波数利用効率を画期的に高められる次世代無線通信技術として大きな注目を集めている。MIMO システムにおいては、同一周波数を用いて複数の異なるビット系列を各アンテナから並列同時送信し、受信機側では複数のビット系列が混在した信号から高度な信号処理によりもとの各ビット系列を分離受信する。しかしながらそのための演算量は一般に大きく、ビット誤り率を劣化させることなく、かつ低演算量で実現できる実時間復号アルゴリズムの開発が不可欠である。そこで、本論文では空間・時間・周波数各軸を有効利用した低演算量かつビット誤り率特性に優れた MIMO 受信アルゴリズムに関する研究成果について述べている。

本論文は全14章から構成されている。

第1章は序論であり、MIMO 無線通信に関する基本技術・研究背景および本論文の構成が説明されている。

第2章から第6章はトレリス符号化変調 (TCM) を用いた MIMO システムにおける最尤系列推定 (MLSE) 受信機の研究について述べている。

まず第2章では MLSE の特性と見通し内通信における TCM の効果を実験により解明している。第3章では見通し外環境における特性改善方法として空間インタリーブ方式を提案し、MLSE の演算量を増大させることなく優れた特性改善効果が得られることを示している。第4章では空間インタリーブの効果を実験により詳しく解析している。第5章では空間インタリーブを拡張した MIMO 特有の自動再送要求 (ARQ) 方式を提案しその有効性を示している。第6章では数値解析における QR 分解を利用する MLSE 適応等化器の演算量削減方式に関する評価を行いその有効性を示している。

第7章は低密度パリティ検査 (LDPC) 符号を用いる MIMO システムにおいて周波数領域等化 (FDE) を繰り返す方式について研究している。FDE における低演算量化を行い、かつ特性改善効果をもたらす整合フィルタ近似式を導出し、その効果を明らかにしている。

第8章から第11章までは最尤判定 (MLD) 受信機に関する低演算量化、ハードウェア実装法の提案、探索空間の解析、近似アルゴリズムの利用、周波数選択性フェージングへの拡張などについて述べている。

第8章は QR 分解などの高負荷行列演算を用いない新たな低演算量探索手法を提案し、特性劣化を招くことなく乗算回数・加算回数を大きく削減可能であることを明らかにしている。第9章では低演算量を実現するメトリック演算法を検討し、ハードウェア試作を行って、ギガビット無線伝送を達成する MLD 受信回路を1チップの FPGA (Field Programmable Gate Array) により実現できることを示している。第10章では MLD の探索空間を解析し、高次のダイバシティが利用できる場合、局所点探索アルゴリズムにより近似できることを示している。さらに、ニューラルネットワークによる並列信号処理の有効性を報告している。第11章では近似 MLD を繰り返し用いる等化方式の提案を行い、広帯域伝送時の遅延波を有

効に利用することで白色ガウス雑音通信路上の理想特性に漸近する優れた特性が得られることを明らかにしている。

第12章では近傍端末の協力を得ることにより実現可能な仮想的な MIMO 多重中継について検討を行い、リンクレベルシミュレーションにより周波数領域の時空間ブロック符号 (STBC) の有効性、遅延ダイバーシチ中継の効能、協力空間多重の重要性を明らかにしている。このとき、第7章で提案した繰り返し FDE を STBC 用に拡張し適用することで、周波数利用効率が高められることを示している。

第13章では STBC を用いた協力中継の効果を車車間通信におけるシステムレベルで評価している。車車間通信システムにおけるトポロジーの変化によりマルチホップ通信の伝送効率が低下するという問題を、協力中継により大きく改善できる可能性を示している。

第14章は結論であり、本論文で得られた主要な研究成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

複数の送受信アンテナを用いて周波数利用効率を画期的に高めうる MIMO 無線伝送は次世代無線通信にとって不可欠な技術である。本論文では主に MIMO 受信機の特性改善ならびに演算量削減を目的とした信号処理について研究を行っており、得られた主要な研究成果は次の通りである。

(1) 一般に優れた特性を示す MIMO システムが、見通し内伝搬路においては特性が劣化しうることを無線周波数帯での室内実験により確認した。そしてトレリス符号化変調の採用によりこの特性劣化が大きく軽減できることを明らかにした。また、見通し外伝搬路においては空間インタリーブを適用することにより、最尤系列推定 (MLSE) 受信機の演算量削減、特性改善が可能であることを示した。

(2) MIMO 特有の送信アンテナ空間を利用したハイブリッド自動再送要求方式を提案し、見通し内外において高いスループット特性を実現できることを明らかにした。さらに、受信アンテナ空間を利用することで最尤系列推定アルゴリズムの生き残り状態毎に数値解析における QR 分解を適用し、大きな特性劣化を招くことなく演算量を大きく削減できることを示した。

(3) 広帯域伝送時に有効な周波数領域等化 (FDE) を繰り返し適用するターボ等化を検討し、低密度パリティ検査符号の利用により、低演算量で優れたビット誤り率特性が実現できることを明らかにした。さらに、FDE における整合フィルタ近似式を導出し、一層の低演算量化、特性改善が可能であることを示した。

(4) 行列演算を回避して低演算量化を実現する最尤判定 (MLD) 復号法の提案を行った。そして低演算量メトリック計算法を採用したハードウェア試作を行い、ギガビット伝送が可能な MLD 回路を1チップで実現できることを明らかにした。

(5) MLD の探索空間の解析を行い、高いダイバーシチ次数が得られる場合に局所探索を行う近似アルゴリズムが有効である可能性を示した。さらにニューラルネットワークや山登り探索を行う近似アルゴリズムの有効性を示し、遅延パスダイバーシチを利用した広帯域伝送に適した近似 MLD の繰り返し等化手法を提案した。

(6) 近傍の端末が協力して仮想的な MIMO 中継伝送を行う方式について検討し、リンク容量の増大化を図る上で時空間符号化、遅延ダイバーシチ、空間多重が有効であることを明らかにした。さらに車車間通信システムに適用して評価を行い、時空間符号化協力中継がシステム容量を高める上で有効であることを示した。

以上本論文は、MIMO 受信機の低演算量かつ高品質化を狙いとして、時間軸だけでなく空間や周波数軸を有効に利用した信号処理アルゴリズムの提案を行い、さまざまな条件下でそれらの有効性を明らかにしたものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年7月20日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。