

学 位 論 文 題 名

Performance Evaluation and Robustness Improvement of MIMO E-SDM Systems in Time-Varying Fading Channels

(時変フェージングチャネルにおける

MIMO E-SDM システムの特性評価と信頼性改善)

学位論文内容の要旨

無線通信技術は、マルコーニによる実用化以来、約 100 年を経た今日、携帯電話や無線 LAN に代表されるように、我々にとって必須のインフラストラクチャとなっている。また、インターネットの普及や画像アクセス等のため、無線通信においてもブロードバンド伝送が要求され、通信容量の増加が重要な研究課題になっている。周波数は人類にとって共通の貴重な資産であることから、使用する周波数帯域幅を拡大することなく、通信容量を増加させる手法の開発は極めて重要と言える。

上述の目的を達成する方式として、送信側と受信側の双方に複数のアンテナ素子を設置する MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムが近年、鋭意研究されている。電磁波を散乱する物体が多数存在する多重波伝搬フェージング環境においては、送信アンテナと受信アンテナ間のチャネル (伝達関数) は、一般に確率変数とみなされる。チャネル情報が送信側において不明の時には、各送信アンテナから等電力で同じ変調方式を用いて伝送が行われる。これは空間分割多重 (SDM; Spatial Division Multiplexing) 方式と呼ばれている。各送信アンテナからの信号は、受信側で干渉になることから、その除去が必要になる。スマートアンテナ技術である空間フィルタリング、ベル研究所で開発された順序付け逐次復号 (BLAST; Bell Laboratories Space-Time Architecture)、あるいは、最尤推定を用いることにより、干渉の除去と送信信号の分離が可能である。

一方、受信側からチャネル情報がフィードバックされるか、TDD (Time Division Duplexing) 方式のように送受信が同じ周波数帯域が用いられる場合には、送信側においてもチャネル情報を得ることができる。これを用いることによって、最適な送信方式 (ビームフォーミング) が可能となり、最大の通信容量を実現することが可能となる。具体的には、送受信アンテナ間のチャネルを要素とする行列を用いて計算される固有ベクトルを送信ベクトルとして用いることにより、理想的には送信ストリーム間に干渉のない多重化が可能になる。また、各ストリームに適切な送信電力と変調方式を割り当てるリソース制御を行うことによって、良好な伝送特性が実現できる。これは MIMO システムを用いた固有ビーム空間分割多重 (MIMO E-SDM; Eigenbeam-Space Division Multiplexing) 方式と呼ばれている。しかし、現実の伝搬環境では、端末や散乱体が移動するためフェージングは時間変動することになる。この場合、送信ビームを決定するために用いたチャネル特性と実際に信号を送信する時のチャネルが異なっているため、受信側でストリーム間の干渉が生ずるとともに、リソース制御は適切なものでなくなる。そのため、伝搬環境の変動が激しいほど、即ち、最大ドップラー周波数が

高いほど、受信特性が劣化を生ずることになる。

本論文は、時変動フェージング環境における MIMO E-SDM 方式の特性評価を行い、そのような環境においても特性の劣化が少ない信頼性の高い送信方式を提案したものであり、全体は 8 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、研究の背景、目的、および、本文の概要について述べている。

第 2 章では、MIMO システム、および、それを用いた SDM 方式と E-SDM 方式について、それらの基本概念を述べ、定式化を行っている。

第 3 章では、始めに時変動フェージング環境における狭帯域 MIMO E-SDM 方式の特性を改善する手法を提案している。これは過去の ACK パケットにより、それぞれの時刻におけるチャネルを推定し、それらを用いて実際の送信時刻におけるチャネルを予測することにより、送信ベクトルの決定とリソース制御を行うものである。チャネル予測のために 3 通りの方式について述べている。第 1 の方式は、過去の 2 個の ACK パケットを用いて推定されたチャネルを直線により外挿を行うものである。第 2 の方式は、過去の 3 個のチャネルに 2 次関数を適用して予測するものである。第 3 の方式は過去の 3 個のチャネルを用いて指数関数を用いて予測するものである。この時に必要になる最大ドップラー周波数は Jakes モデルを仮定して推定している。これらの方式の特性を評価するため、HIPERLAN/2 を想定した通信システムについて、計算機シミュレーションを行った。その結果、チャネルの予測を行わない方式の場合には、最大ドップラー周波数が高くなるにつれて著しく特性が劣化することが明らかになった。直線外挿によるチャネル予測を行うと、特性は改善されるものの、高い最大ドップラー周波数においては劣化が認められる。一方、2 次関数、あるいは、指数関数を用いたときには、特性が著しく改善されることが示された。

第 4 章では、広帯域伝送における MIMO E-SDM 方式について論じている。広帯域伝送に伴う符号間干渉を防ぐために OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式を用いることを想定している。このような MIMO-OFDM E-SDM 方式に第 3 章で提案した手法を適用する場合、サブキャリア毎にチャネル予測を行うと、多数の予測演算を行う必要がある。ここでは、時間領域のチャネル(インパルス応答)を予測し、それらのフーリエ変換により各サブキャリアのチャネルを求める方式を提案している。更に、各サブキャリアのチャネル毎に変調方式を最適化すると、その情報を受信側に報知するためのヘッダー情報が多くなり過ぎるため、各ストリームにおけるサブキャリアの変調方式を同一にすることを提案している。これらを計算機シミュレーションにより、評価を行い、第 3 章と同じようにチャネル予測の有効性、特に、2 次関数と指数関数の予測が優れていることを示した。また、サブキャリアに共通の変調方式を用いても特性の劣化は少ないことが示された。

これまでの評価は、Jakes モデルを仮定して計算機シミュレーションにより、行ったものである。実際の環境では、一般には、このような仮定が成立するとはいえないため、実環境での実験的評価が必要になる。本論文では室内における伝搬実験により得られたチャネルデータを用いて、MIMO E-SDM 方式の評価を行った。第 5 章では、その実験の概要を述べている。

第 6 章では、実測された伝搬チャネルデータに基づく狭帯域 MIMO E-SDM 方式の評価結果を明らかにした。送受信間が見通しになる場合も含めて、第 3 章で提案したチャネル予測方式、特に、2 次関数と指数関数の予測が特性改善に有効であることが示された。

第 7 章では、実測チャネルデータを用いた MIMO-OFDM E-SDM 方式の評価結果を述べている。第 4 章の計算機シミュレーションの結果と同様に提案方式であるチャネル予測が、実際の時変動

フェージング環境において有効であることが明らかになった。

第 8 章は結論であり、本論文の内容と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

Performance Evaluation and Robustness Improvement of MIMO E-SDM Systems in Time-Varying Fading Channels

(時変フェージングチャネルにおける

MIMO E-SDM システムの特性評価と信頼性改善)

携帯電話や無線 LAN 等の普及により、周波数は人類にとって極めて貴重な資産となっている。今後、更なるブロードバンド化とユビキタスネットワークの進展により、周波数帯域が逼迫することが懸念されている。従って、周波数利用効率の高い通信システムの開発が重要な技術課題になっている。この問題を解決する手段として近年、複数のアンテナを送受信機双方に設置した MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) システムが広く研究されるに至っている。送信側においてチャネル情報が得られている場合には、最適な送信方式が可能となり、最大の通信容量を実現することができる。これは MIMO システムを用いた固有ビーム空間分割多重 (MIMO E-SDM; Eigenbeam-Space Division Multiplexing) 方式と呼ばれている。しかし、現実の伝搬環境では、端末や散乱体が移動するためチャネルは時間変動することになる。この場合、送信ビームを決定するために用いたチャネル特性と実際に信号を送信する時のチャネルが異なっているため、受信側でストリーム間の干渉が生ずる。その結果、伝搬環境の変動が激しいほど、即ち、最大ドップラー周波数が高いほど、受信特性が劣化を生ずることになる。

本論文は、時変動フェージング環境における MIMO E-SDM 方式の特性評価を行い、そのような環境においても特性の劣化が少ない信頼性の高い送信方式を提案したものであり、全体は 8 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、研究の背景、目的、および、本論文の概要について述べている。

第 2 章では、MIMO システム、および、それを用いた空間多重方式について基本概念を述べている。

第 3 章では、TDD 系における時変動フェージング環境における狭帯域 MIMO E-SDM 方

式の特性を改善する手法を提案している。これは ACK から得られる過去のチャネル推定値から、実際の送信時刻におけるチャネルを予測することにより、送信ベクトルの決定とリソース制御を行うものである。本論文では、チャネル予測のために3通りの方式を提案している。第1の方式は、ACK パケットを用いて推定されたチャネルを直線により外挿を行うものである。第2の方式は、2次関数を適用して予測するものである。第3の方式は指数関数を用いて予測するものである。これら3通りの方式の特性を評価するため、HIPERLAN/2を想定した通信システムについて計算機シミュレーションを行った。その結果、チャネルの予測を行わない方式の場合には、最大ドップラー周波数が高くなるにつれて著しく特性が劣化するが、提案したチャネル外挿方式を用いると誤り率特性が改善されることが確認された。特に、2次関数、あるいは、指数関数を用いたときには、高い最大ドップラー周波数においても劣化が少ないことが示された。

一方、広帯域伝送系においては、符号間干渉が発生することになる。この問題は OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式を用いることによって回避できる。第4章では、OFDM 方式を用いた広帯域系への MIMO E-SDM 方式について論じている。時変動フェージング環境に対応するため、時間領域のチャネル(インパルス応答)を予測し、それらのフーリエ変換により各サブキャリアのチャネルを求める方式を提案している。このことを計算機シミュレーションを用いて評価を行い、第3章と同じようにチャネル予測の有効性、特に、2次関数と指数関数の予測が優れていることを述べている。また、通信系を簡易化するために全てのサブキャリアに共通の変調方式を用いても特性の劣化は少ないことが示されている。

第5章では、提案方式の実験的検証のために行った伝搬実験の概要を述べている。前章までの評価は Jakes モデルを仮定した計算機シミュレーションに基づいて行ったものであるが、実際の伝搬路においては必ずしもこのモデルは成立しないため、実環境での評価が必須となる。ここでは、室内における MIMO チャネル測定法、および、時変動伝搬環境におけるチャネルの自己相関とドップラースペクトルを明らかにしている。

上述の測定系により得られた時変動 MIMO チャネルデータを用いて、第6章では狭帯域 MIMO E-SDM 方式におけるチャネル予測方式の評価を行った。その結果、第3章で提案した方式が実伝搬路においても特性改善に有効であることが示された。

第7章では、実測伝搬データを用いて MIMO-OFDM E-SDM 系におけるチャネル予測、および、全てのサブキャリアに共通の変調方式を用いる簡易方式の評価を行った。本論文で提案した方式は広帯域の実伝搬環境においても有効であることが明らかになった。

第8章は結論であり、本論文の内容と得られた成果を要約している。

これを要するに、著者は、周波数利用効率改善が期待される MIMO E-SDM システムの時変動チャネル環境における特性評価とその改善法について重要な新知見を得たものであり、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。