

学 位 論 文 題 名

Studies on MIMO Spatial Multiplexing for High-Speed Wireless Communications

(高速無線伝送を実現する MIMO 空間多重に関する研究)

学位論文内容の要旨

1990 年代から爆発的に普及した携帯電話は、今や国内における加入契約数が 1 億を超え、社会インフラとして我々の生活に必要不可欠な存在となっている。近年は、携帯電話によるデータ通信が増加しており、特に画像や映像、ゲームなどの大容量通信が急増している。また、無線 LAN は複雑な配線を必要としない無線ブロードバンドとして普及が進んでおり、更にホットスポットやフリースポットと呼ばれる公衆無線アクセスサービスの展開により一層需要が高まっている。現行の無線 LAN の国際規格では理論値として最大 54 Mbps を実現しているが、現在策定中である次世代の無線 LAN 規格では実効速度 100 Mbps、将来的には 600 Mbps までを視野に入れている。一方、携帯電話では、昨年サービスが開始された HSDPA と呼ばれる第 3.5 世代移動通信において下り最大 14.4 Mbps を実現しており、2010 年頃を目途に最大 100 Mbps 程度、第 4 世代移動通信では約 1 Gbps の高速伝送を目標とした商用サービスが検討されている。社会の未来像として、誰もが「いつでも、どこでも」IT ネットワークにつながることをできるユビキタス社会の概念が提唱される中、こうした高速化・大容量化の需要に応えることは無線通信分野の重要課題といえる。

使用する周波数帯域幅を増加させることなく、このような高速伝送を実現するブレイクスルーとして期待されるのが MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムである。送信側と受信側の双方に複数のアンテナ素子を備えた MIMO システムは、1990 年代後半に登場して以来、国内外を問わず研究が盛んであり、既にいくつかの無線規格では必須の技術として検討されている。MIMO システムにおいて高速化を実現する伝送方式として、アンテナ数に応じた複数のストリームを同時に送信することにより伝送速度の上昇を可能にする空間多重方式 (Spatial Multiplexing) がある。空間多重方式は空間分割多重 (SDM; Space Division Multiplexing) と固有ビーム空間分割多重 (E-SDM; Eigenbeam-Space Division Multiplexing) の 2 つに大きく分類できる。SDM は、各送信アンテナから独立に信号ストリームを送信することで容易に伝送効率を高めるものであり、送受信間の伝送路情報 (チャネル行列) が受信側でのみ得られる場合に有効な方式である。一方、送信側においても伝送路情報が得られる場合、E-SDM 方式が適用可能となる。これは、チャネル行列から算出される固有ベクトルを送信ウェイトとして各ストリームに乗ずることにより、空間的に直交した固有ビームを形成する手法であり、最大の MIMO 通信容量が実現できる。

SDM では空間的に多重化された複数の信号ストリームが受信点で互いに干渉となるため、それらを分離検出する必要がある。信号分離が容易となるのは、一般に送受信間が見通しとならない見

通し外 (NLOS; non-line-of-sight) 環境で生起すると言われる、各送受信アンテナ間のチャネルが無相関散乱により独立に変化する場合である。しかし、実環境において通信を行う場合、送受信間が見通し (LOS; line-of-sight) となる環境も存在し得る。このとき、直接波の影響によりチャネルの独立性が崩れ、信号分離が困難となる可能性がある。そこで、本論文では、屋内で測定した実伝搬データより、LOS 環境と NLOS 環境の双方における SDM の挙動を多角的に解析している。また、実環境における E-SDM の特性評価も併せて行っている。結果から、SDM が LOS 環境においてもロバストであり、一般に屋内環境では SDM を用いて高速伝送を実現することが可能であることを明らかにする。また、E-SDM は LOS 環境において優れた特性を示すが、SDM、E-SDM とともにアンテナ配列により特性が大きく変動する傾向にあることを示す。

一方、MIMO システムを広帯域伝送に拡張した場合、マルチパス対策として OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式の適用が有効である。MIMO-OFDM における最適な送信処理は、各サブキャリアにおいて E-SDM を行うことである。しかし、各サブキャリアで固有値演算を行い固有ベクトルを算出するとき、サブキャリア数に比例して計算量が増大し、送信機では大きな計算負荷となる。また、サブキャリア毎に得られる固有ベクトルは周波数間での位相連続性を持たない。固有ベクトルの不連続性は、受信側で観測される実効的な MIMO チャネルの遅延広がりを大きくしてしまう。この場合、サブキャリア間の周波数相関を利用したウィンドウ処理によるチャネル推定精度の改善手法が適用できないため、特性劣化が避けられない。これらの問題を解決するため、本論文では周波数領域で連続性を持つ疑似固有ベクトルを簡易に求める手法を提案し、それにより実効チャネルの遅延広がりを抑制できることを示す。また、疑似固有ベクトルを用いた疑似固有ビーム空間分割多重方式 (PE-SDM; Pseudo E-SDM) の伝送特性を求め、ウィンドウ処理を適用することにより極めて低演算量でありながら通常の E-SDM と同等、またはそれ以上の良好な特性が得られることを明らかにしている。

本論文は、以下の 7 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、研究背景、本論文の目的、及び、概要について述べる。

第 2 章では、MIMO 空間多重についての概要を述べ、SDM、及び、E-SDM についての定式化を行う。併せて、Jakes モデルを用いた無相関散乱 MIMO チャネルの模擬方法についても検討する。

第 3 章では、行った屋内伝搬実験の概要について述べる。また、得られた伝搬データから、実験環境の伝搬特性についても解析する。

第 4 章では、まず実験に用いたアンテナ特性、及び、実験環境における MIMO チャネル特性を解析する。次に、総送信電力一定の条件の下、実験環境における SDM、及び、E-SDM の特性評価を行う。このとき、理想的な通信特性の指標としてチャネル容量を、より現実的な通信特性の指標としてビット誤り率を用い、上述のアンテナ、及び、MIMO チャネル特性と併せて考察する。また、より実用的なシステムとして、MIMO-OFDM に SDM を適用した場合の実験特性も評価する。

第 5 章では、まず広帯域 MIMO システムモデルについて述べ、提案する疑似固有ベクトルの基本概念と算出法について説明し、周波数連続性、及び、演算量を評価する。次に、疑似固有ベクトルの特性を利用した各種ウィンドウ手法を提案する。MIMO-OFDM におけるビット誤り率特性、及び、広帯域シングルキャリア MIMO 伝送におけるスループット特性により、疑似固有ベクトルを用いた PE-SDM 方式とウィンドウ手法の特性解析を行う。

第 6 章では、伝搬実験データを用いた MIMO-OFDM 伝送シミュレーションにより、提案した

PE-SDM 方式の実環境における有効性を示す。

第 7 章は結論であり、本論文の内容と成果をまとめる。加えて、今後の課題についても簡潔に述べる。

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

Studies on MIMO Spatial Multiplexing for High-Speed Wireless Communications

(高速無線伝送を実現する MIMO 空間多重に関する研究)

近年、移動体通信の普及に伴い、無線に利用できる周波数資源の枯渇が懸念されている。一方で、次世代移動体通信や無線 LAN 等では更なる高速化・大容量化が求められている。周波数帯域幅を増加させることなく、高速伝送を実現するブレイクスルーとして期待される技術が、送信側と受信側の双方に複数のアンテナを備えた MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムである。MIMO システムにおいて高速化を実現する方式として、複数の空間ストリームを並列伝送することにより通信速度の上昇を可能にする空間多重方式 (Spatial Multiplexing) がある。空間多重方式は空間分割多重 (SDM; Space Division Multiplexing) と固有ビーム空間分割多重 (E-SDM; Eigenbeam-Space Division Multiplexing) の 2 つに大きく分類できる。SDM は、各送信アンテナから独立に信号ストリームを送信することで容易に伝送効率を高めるものであり、送受信間の伝送路情報が受信側でのみ得られる場合に有効な方式である。一方、送信側においても伝送路情報が得られる場合、チャネル行列から算出される固有ベクトルを送信ウェイトとすることにより空間的に直交した固有ビームを形成する E-SDM が可能となり、最大の MIMO 通信容量が実現できる。

SDM では空間的に多重化された複数のストリームを受信機で分離検出する必要がある。一般に、送受信間が見通し外 (NLOS; non-line-of-sight) となる環境において容易に信号分離できるが、実際の通信では見通し (LOS; line-of-sight) となる環境も存在し得る。このとき、直接波の影響によりチャネルの独立性が崩れ、信号分離が困難となる可能性がある。そこで、本論文では、屋内で測定した実伝搬データより、LOS 環境と NLOS 環境の双方における SDM の挙動を詳細に検討している。また、E-SDM の特性評価も併せて行っている。これらの結果から、一般に屋内環境では SDM を用いて高速伝送を実現する

ことが可能であることを明らかにしている。また、E-SDM は LOS 環境において優れた特性を示すが、SDM、E-SDM とともにアンテナ配列により特性が大きく変動する傾向にあることを示している。

一方、広帯域 MIMO システムでは、マルチパス対策として OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式の適用が有効である。MIMO-OFDM における最適な送信処理は、各サブキャリアにおいて E-SDM を行うことである。しかし、全てのサブキャリアについて固有値演算を行うことは、送信機に多大な演算負荷を要することになる。また、サブキャリア毎に得られる固有ベクトルは一般に周波数不連続性となり、受信側で観測される実効的なチャネルの遅延広がりを大きくしてしまう。この場合、ウィンドウ処理によって雑音を抑圧し、伝送路推定精度を改善する手法が適用できないため、特性劣化が避けられない。これらの問題を解決するため、本論文では周波数連続性を持つ疑似固有ベクトルを簡易に求める手法を提案し、それにより遅延広がりを抑制できることを示している。また、疑似固有ベクトルを用いた疑似固有ビーム空間分割多重方式 (PE-SDM; Pseudo E-SDM) の伝送特性を求め、極めて低演算量でありながら E-SDM と同等、またはそれ以上の良好な特性が得られることを明らかにしている。

本論文は、以下の 7 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、研究背景、本論文の目的、及び、概要について述べている。

第 2 章では、MIMO 空間多重についての概要を述べ、SDM、及び、E-SDM についての定式化を行っている。

第 3 章では、行った屋内伝搬実験の概要を述べており、また、実験環境の伝搬特性を解析している。

第 4 章では、まず実験に用いたアンテナ特性、及び、実験環境における MIMO チャネル特性を解析している。次に、実験環境における SDM、及び、E-SDM の特性評価を行っている。

第 5 章では、提案する疑似固有ベクトルの基本概念と算出法について説明し、周波数連続性、及び、演算量を評価している。次に、疑似固有ベクトルの特性を利用した各種ウィンドウ手法を提案している。広帯域 MIMO 伝送における特性解析により、PE-SDM 方式とウィンドウ手法の評価を行っている。

第 6 章では、伝搬実験データを用いた MIMO-OFDM 伝送シミュレーションにより、提案した PE-SDM 方式の実環境における有効性を示している。

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 システムについて屋内伝搬実験結果を用いてその特性評価を行うとともに、演算負荷を軽減した広帯域 MIMO 伝送方式を提案したものであり、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。