学位論文題名

高速ワイヤレスアクセスシステムのための
高精度電波伝搬推定法の研究

学位論文内容の要旨

MIMO 技術は、送受信アンテナそれぞれに複数のアンテナ素子を用い、送受信アンテナの一方もしくは双方のビームを伝搬環境に応じて制御することによって伝搬環境を空間的に分離し、同一周波数、同一時間に複数のデータを送受信することで、高速伝送を実現する。MIMO 技術を用いた高速ワイヤレスシステム(以下、MIMO システム)は、遅延波の到来角度広がり、それに伴う空間相関特性が MIMO システムの通信品質に大きく影響を与えることが知られており、これら特性は伝搬環境に大きく依存する。そのため、MIMO システムの性能評価や置局設計を行う際には、利用シーンに応じた伝搬特性推定法を用いて検討を行なう必要がある。

電波伝搬特性推定法の検討は伝送方式に密接に関連し、これまで狭帯域ワイヤレスシステムの評価や通信エリアの設計、干渉検討を行うことを代表的な目的とした伝搬損失の距離特性の検討、および広帯域ワイヤレスシステムの評価を行うことを目的とした遅延プロファイルや周波数特性に代表される広帯域伝搬特性の検討を中心に進められてきた。新たな伝送方式である MIMO 技術に対する伝搬特性の検討では、従来の距離特性および時間/周波数特性の検討項目に加え、新たに空間特性の評価軸が加わった時空間伝搬特性を明らかにする必要がある。ワイヤレスシステムが実際に適用される実環境では、屋外に適用するシステムと屋内に適用するシステムでは評価に必要となる伝搬特性が大きく異なることが知られているが、MIMO システムに対する性能評価や置局設計を行う上では、それぞれの環境に対する時伝搬特性推定法を確立することが課題となっている。

また、伝搬特性の計算機による電磁界シミュレーションは、近年の計算機性能の大幅な向上により一般的に用いられる伝搬特性推定手法となっているが、MIMO システムに対する検討を行う際には、送受信アンテナを構成するすべてのアンテナ素子間について伝搬特性を推定する必要があるため、計算量が増加する問題を有している。したがって、MIMO システムに対する研究開発を推進するためには、高効率な計算機シミュレーション手法を確立することが課題となっている。

本研究は、以上の課題を解決するために MIMO システムに対する電波伝搬推定法を確立することで、高信頼なシステム設計や高精度な置局設計に貢献するものであり、以下に述べるように全 7 章で構成した。

第 1 章では、本研究の背景と目的と共に本研究の概要について述べる。

第 2 章では、場所固有の伝搬特性を推定する代表的な計算機シミュレーション手法であるレイトレース法を用いた MIMO 伝搬チャネル推定の計算量削減手法の提案を行う。レイトレース法による MIMO システムの電磁界シミュレーションは、送信アンテナ素子数×受信アンテナ素子数に比例して計算量が増加してしまう問題を有している。この問題に対し、すべてのアンテナ組み合わせの

伝搬経路を、特定の送信アンテナと受信アンテナの組み合わせ間の伝搬経路を代用することにより MIMO 伝搬チャネルを高精度に推定可能とする手法の提案を行う。この提案手法は単一経路に対する伝搬経路長および反射角の最大誤差に対する推定精度から評価が行われている。併せて、簡易なシミュレーションモデルを用いた多重反射波環境における推定精度の総合的な評価を行った。これらの評価から、提案手法によって計算量を大幅に抑えつつ高精度に MIMO システムの伝搬特性が推定可能となることを明らかにした。

次に、第 3 章および第 4 章では、指向性アンテナを用いた MIMO システムに対する屋外伝搬特性推定法を明らかにしている。基地局間マルチホップシステムにおいて効率の良いネットワークを構築するためには、基地局通信用アンテナに利得の大きな指向性アンテナを用い、基地局自身が作る無線ゾーンとホップ先基地局が作る無線ゾーンとのオーバーラップ部分を極力小さくすることが必要である。しかし、MIMO システムにおいて指向性アンテナを用いる場合、受信 SNR の改善が期待できる一方で、アンテナ間相関の上昇を引き起こし、MIMO システムの伝送特性を劣化させることが懸念される。そこで本研究では、指向性アンテナを用いる MIMO システムが屋外基地局間マルチホップシステムに有効である事を実験的に明らかにした。さらに、アンテナ指向性の影響を考慮可能な基地局間 MIMO 通信のための伝搬特性推定法の提案を行い、高精度に伝搬特性を推定可能であることを明らかにした。

第 5 章では、屋内 MIMO 協調伝送システムに対する伝搬特性推定手法を明らかにした。近年の MIMO システムに対する新たな取り組みとして、送信局や受信局 1 局あたりのアンテナ素子数を実際に増加することなく高い周波数利用効率を実現することを目的とする MIMO 協調伝送システムが検討されているが、屋内における基地局間協調伝送システムの伝搬特性推定法は未検討の領域であり、早急な伝搬特性推定法の確立が待たれている。そこで、本章では、直接波と散乱波のみで屋内 MIMO 協調伝送システムを評価することが可能となる伝搬特性推定法を提案した。本提案法を用いた推定結果と測定結果の比較を行い、相関行列から計算される固有値とチャネル容量の面で実環境における測定結果と高い精度で提案法が一致することを明らかにした。

第 6 章では、屋内環境における伝搬チャネルの変動特性について実験的に明らかにすることを目的としている。SDMA のような、伝搬チャネルの時変動によって通信品質が大きく劣化するシステムに対して、適切な時変動特性の評価を行うためには、システムの利用形態に応じた適切なパラメータ設定を行うことが重要である。そこで、ドップラスペクトラムおよび遅延プロファイルに対する測定を実施し、実環境に即した伝搬チャネル変動に対する評価を可能とする伝搬特性推定法の提案を行った。ドップラスペクトラム特性はベル型関数を用いてコヒーレンス時間に対する評価を行うとともに、送受信間距離に基づくドップラスペクトル形状の差を考慮可能な新しい実験式を明らかにした。さらに、屋内 LOS 環境における遅延プロファイルの先頭波の変動特性に関して、レベル変動の分布は直接波および天井面と床面で反射されて到来する遅延波の 3 波で構成する新たな遅延プロファイル変動特性推定法を明らかにした。

第 7 章は結言であり、本研究の成果を要約した。

学位論文審査の要旨

主査	教授	野島俊雄
副査	教授	宮永喜一
副査	教授	小柴正則
副査	教授	小川恭孝
副査	准教授	山本学

学位論文題名

高速ワイヤレスアクセスシステムのための 高精度電波伝搬推定法の研究

MIMO 技術を用いた高速ワイヤレスシステム (以下, MIMO システム) は, 遅延波の到来角度広がり, それに伴う空間相関特性が MIMO システムの通信品質に大きく影響を与えることが知られており, これら特性は伝搬環境に大きく依存する. そのため, MIMO システムの性能評価や置局設計を行う際には, 利用シーンに応じた伝搬特性推定法を用いて検討を行なう必要がある. 新たな伝送方式である MIMO 技術に対する伝搬特性の検討では, 従来の距離特性および時間/周波数特性の検討項目に加え, 新たに空間特性の評価軸が加わった時空間伝搬特性を明らかにする必要がある. MIMO システムに対する性能評価や置局設計を行う上では, それぞれの環境に対する時伝搬特性推定法を確立することが課題となっている. また, 伝搬特性の計算機による電磁界シミュレーションは, 近年の計算機性能の大幅な向上により一般的に用いられる伝搬特性推定手法となっているが, MIMO システムに対する検討を行う際には, 送受信アンテナを構成するすべてのアンテナ素子間について伝搬特性を推定する必要があるため, 計算量が増加する問題を有している. したがって, MIMO システムに対する研究開発を推進するためには, 高効率な計算機シミュレーション手法を確立することが課題となっている.

本論文は, MIMO システムに対する電波伝搬推定法を確立することで, 高信頼なシステム設計や高精度な置局設計を実現するものであり, これらの内容につき, 各章で詳細を述べている.

第 1 章では, 研究背景および研究の概要について述べている.

第 2 章では, 伝搬特性を推定する代表的な計算機シミュレーション手法であるレイトレース法を用いた MIMO 伝搬チャネル推定の計算量削減手法の提案を行っている. MIMO システムのレイトレースシミュレーションは, 送信アンテナ素子数 $\times$ 受信アンテナ素子数に比例して計算量が増加してしまう問題を有している. この問題に対し, 特定の送信アンテナと受信アンテナの組み合わせ間の伝搬経路を代用することにより MIMO 伝搬チャネルを高精度に推定可能とする手法の提案を行っている. 簡易なシミュレーションモデルを用いた多重反射波環境における推定精度の総合的な評価を行っている. これらの評価から, 提案手法によって計算量を大幅に抑えつつ高精度に MIMO シス

テムの伝搬特性が推定可能となることを明らかにしている。

第3章および第4章では、指向性アンテナを用いた MIMO システムに対する屋外伝搬特性推定法を明らかにしている。基地局間マルチホップシステムにおいて効率の良いネットワークを構築するためには、基地局通信用アンテナに利得の大きな指向性アンテナを用い、基地局自身が作る無線ゾーンとホップ先基地局が作る無線ゾーンとのオーバーラップ部分を極力小さくすることが必要である。しかし、指向性アンテナを用いる場合、受信 SNR の改善が期待できる一方で、アンテナ間相関の上昇を引き起こし、システムの伝送特性を劣化させることが懸念される。そこで、指向性アンテナを用いる MIMO システムが屋外基地局間マルチホップシステムに有効である事を実験的に明らかにし、さらに、アンテナ指向性の影響を考慮可能な基地局間 MIMO 通信のための伝搬特性推定法の提案を行い、高精度に伝搬特性を推定可能であることを明らかにしている。

第5章では、屋内 MIMO 協調伝送システムに対する伝搬特性推定手法を明らかにしている。直接波と散乱波のみで屋内 MIMO 協調伝送システムを評価することが可能となる伝搬特性推定法を提案している。本提案法を用いた推定結果と測定結果の比較を行い、相関行列から計算される固有値とチャンネル容量の面で実環境における測定結果と高い精度で提案法が一致することを明らかにしている。

第6章では、屋内環境における伝搬チャネルの変動特性について実験的に明らかにすることを目的としている。SDMA のような、伝搬チャネルの時変動によって通信品質が大きく劣化するシステムに対し適切な時変動特性の評価を行うためには、システムの利用形態に応じた適切なパラメータ設定を行うことが重要である。そこで、ドップラスペクトラムおよび遅延プロファイルに対する測定を実施し、実環境に即した伝搬チャネル変動に対する評価を可能とする伝搬特性推定法の提案を行っている。ドップラスペクトラム特性はベル型関数を用いてコヒーレンス時間に対する評価を行うとともに、送受信間距離に基づくドップラスペクトル形状の差を考慮可能な新しい実験式を明らかにしている。さらに、屋内 LOS 環境における遅延プロファイルの先頭波の変動特性に関し、新たな遅延プロファイル変動特性推定法を明らかにしている。

これを要するに、著者は、無線通信装置の高効率化に寄与する基盤技術に関して有益な新知見を得たものであり、情報通信技術の発展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。