

## (論文内容の要旨)

現行の第3世代移動体通信システムは通話、高速インターネット接続、高画質画像の送受信などの便利なサービスを利用者に提供している。将来の移動体通信システムにおけるサービスのさらなる拡大、多様化に対応するために、超高速情報伝送を実現する次世代通信方式の開発が求められる。次世代通信方式の候補として、従来のDS-CDMA方式と比べて非常に高い情報伝送効率を実現する可能性を有する多入力多出力直接拡散符号分割多元接続(MIMO DS-CDMA)方式が提案されているが、情報伝送の効率と受信器で必要となる計算コストの抑制との間のトレードオフ関係については十分に理解されているとは言えず、システムの多様な構成のもとでの理論的かつ定量的な検討が求められている。

本論文では、MIMO DS-CDMA方式に対して周波数利用効率と計算コストとの両面から適切な送受信器を構成する際に有用な知見を提供することを目的として、送信器における拡散変調方式の設計問題と受信側のマルチユーザ復号器の性能評価問題を理論的に解析している。解析手法としては、情報統計力学に基づく方法論を一貫して使用する。このため、ランダム拡散と大システム極限という二つの理想化のための仮定をおく必要が生じるが、その対価として、数値シミュレーションによる評価が計算コストの観点から困難である最適なマルチユーザ検出器を含む広いクラスの検出器の性能を解析的に評価することが可能となる。

第1章は序論であり、研究の背景を説明するとともに、MIMO DS-CDMA方式に関して解決すべき問題点の提示を行っている。さらに、その解決策として情報統計力学に基づく方法論を提示し、それに関連する先行研究を概説している。

第2章では、解析の準備段階としてフェーディング通信路に対する情報理論、ベイズ推論に基づくマルチユーザ検出器の導出、情報統計力学に基づく解析の鍵となるレプリカ法のアイデアおよび必要となる仮定、の3点について概説している。

第3章では、MIMO DS-CDMA方式の上り回線の数理モデルを導入している。ユーザ間の完全同期と周波数選択性フェーディング通信路とが仮定されている。

第4章では、受信器が完全な通信路状態の情報を利用できるという仮定の下で、拡散変調方式の設計問題を議論している。理論的な観点からの本論文の主要な成果として、大システム極限においてランダム拡散MIMO DS-CDMA通信路が一般的に単一ユーザ時空間符号化MIMO通信路に分解されることを示している。この分解に基づいて、拡散変調方式の違いにより時空間符号化する必要があるか否かという計算コストの面での大きな差異が生じることが明らかにされている。

そして、各ユーザの送信アンテナに対して共通の拡散符号系列を使う拡散変調方式と送信アンテナ毎に異なる拡散符号系列を使用する拡散変調方式との性能比較に基づいて、従来あまり検討されてこなかった拡散変調方式の設計が、実はMIMO DS-CDMA方式において低計算コストかつ高性能な送受信器を構成する際に重要である、との知見を得ている。

さらに、ダイバーシティと空間多重化利得とのトレードオフに基づいて拡散変調方式の性能を評価するための枠組みを与えている。

第5章では、パイロット信号に基づく通信路推定の影響を考慮した上で、計算コスト低減のためのマルチユーザ復号器の簡略化に起因する三つの性能劣化を評価している。三つの性能劣化とは、最適なマルチユーザ復号器においてユーザ毎の復号器からマルチユーザ検出器へのフィードバックを取り除くことによって生じる性能劣化、得られたマルチユーザ復号器においてユーザ毎の復号器から通信路推定器へのフィードバックを除去することによって生じる性能劣化、最適なマルチユーザ検出を線形マルチユーザ検出で近似することによって生じる性能劣化の三つである。

解析の結果として、低負荷かつ高信号対雑音(SN)比の領域では線形最小平均二乗誤差受信器は最適に近い性能を発揮すること、ならびに高負荷かつ高SN比の領域ではマルチユーザ復号を行うことによって顕著な性能改善が可能であることを明らかにしている。

第6章では、第4章および第5章で示された結果の情報統計力学に基づく導出を行っている。本章は主に導出の骨格を概説したものであり、詳細な解析計算の過程は巻末の付録にまとめられている。

第7章は結論であり、本論文で得られた結果をまとめるとともに、他の重要な無線通信システムに対する情報統計力学からのアプローチの今後の展開について述べている。

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、将来の移動体通信システムへの適用が期待される多入力多出力直接拡散符号分割多元接続(MIMO DS-CDMA)方式について、情報伝送効率と受信器での計算コストとの間のトレードオフ関係を情報統計力学の方法論に基づいて解析的、定量的に把握することを目指した研究をとりまとめたものである。得られた主な成果は以下の通りである。

1. 受信器が通信路状態に関する完全な情報を有している場合における拡散変調方式の設計を検討した。具体的には、各ユーザの複数の送信アンテナに対して同一の拡散符号系列を用いる場合と、互いに異なる拡散符号系列を用いる場合とについて、大システム極限における通信路の分解構造ならびに性能の比較を行い、拡散変調方式の設計が低計算コストかつ高性能のシステムを実現するに際して本質的に重要であることを示した。

2. パイロット信号を用いた通信路状態の推定を考慮した場合に、受信側におけるマルチユーザ復号器の構成の簡略化がどの程度の性能低下を引き起こすかを検討した。具体的には、最適なマルチユーザ復号器をもとに、各ユーザの復号器からマルチユーザ検出器へのフィードバックを除去した構成、加えて各ユーザの復号器から通信路推定器へのフィードバックを除去した構成、さらに最適なマルチユーザ検出を線形マルチユーザ検出で代用した構成、以上4通りの受信器の構成について解析的な性能評価を行った。低負荷かつ高信号対雑音比の条件では線形マルチユーザ検出で最適に近い性能を達成可能であること、および高負荷かつ高信号対雑音比の条件ではマルチユーザ復号が有効であること、などの知見を得た。

3. 上記項目1, 2の検討に際して情報統計力学に基づく解析手法を適用することで、無線通信理論分野において現実的な問題設定に対しても情報統計力学的アプローチが強力かつ有効な方法論を提供していることを示した。

以上のように本論文は、将来の移動体通信システムへの展開の可能性を念頭に置きつつMIMO DS-CDMA方式を検討対象として理論的、定量的な性能解析の方法論を定式化し、多様なシステム構成に対する解析によってシステム設計に関して有用な知見を導いてみせることを通じてその有効性を示したものであり、無線通信理論の分野における情報統計力学的アプローチの確立に寄与するものである。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、論文内容とそれに関連した事項に関する試問を平成21年2月24日に実施した。平易さの点でさらなる向上の余地はあるものの、高度な内容が適切にまとめられて説明がなされたものと認められる。論文内容および試問内容を総合的に判断した結果、合格と認めた。