

学 位 論 文 題 名

MIMO無線伝送における送受信方法に関する研究

(Study on Transmission and Reception Techniques in MIMO Wireless Communications)

学位論文内容の要旨

第4世代移動通信システム(4G)の検討が開始されており、通信端末の高速(低速)移動に対し、下りリンクにおいて100 Mbps(1 Gbps)という非常に高速なピークレートが要求されている。この4Gのスムーズな導入に向け、第3世代(3G)を長期的に発展させた上で、4Gを構築するコンセプトが提唱された。標準化プロジェクトである3GPP(3rd Generation Partnership Project)において、この長期的に発展させるという意味も含め、第3.9世代(3.9G)としてLTE(Long Term Evolution)の無線インターフェース仕様検討が行われ、Release 8として仕様化された。一方、先述の4Gに関しては、3GPPにおいてLTE-Advancedとして検討が開始され、2010年には初期のバージョンであるRelease 10の仕様化が完成しており、さらなる発展を目指してRelease 11以降の検討が行われている。

LTE及びLTE-Advancedでは、通信容量増大のためのキー技術として、Multiple-Input Multiple-Output(MIMO)送受信伝送技術が採用され、既にLTEでは実現に至っている。しかしながら、近年のスマートフォンの普及による無線トラヒックの急激な増大に対応するため、LTE-Advanced及びそれ以降の将来移動通信システムにおいては、更に高度化したMIMO技術の導入が必要となる。したがって、高度化MIMO技術、ならびにこれを実現するための要素技術の検討が必須である。

本論文は、このMIMO送受信伝送技術に着目し、将来移動通信システムにおける更なる通信容量の増大を目的とした送信側における信号処理に関する要素技術、及び、セル端近傍のユーザスループットの改善を目的とした受信側における信号処理に関する要素技術について、筆者がこれまでにを行った研究をまとめたものである。

第1章は序論であり、研究の背景と本論文の概要について述べた。

第2章、及び、第3章では、従来技術として、MIMOシステムの送信側と受信側の基本的な処理技術、及び、LTE並びにLTE-Advancedに関するキー技術の概要を説明している。

第4章から第8章にかけては、筆者の研究成果を記している。

第4章では、MIMO送信技術として、固有ビーム空間分割多重方式適用時のOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)システムにおける、チャネル情報フィードバック量の削減手法について提案した。具体的には、主要な時間領域チャネル成分のみを効率良くフィードバックする方法を提案し、計算機シミュレーションにより従来手法との比較検討を行った。その結果、送信アンテナ数4、受信アンテナ数2とし、かつ、フィードバック情報量の許容量を少なくした場合、従来手法であるコードブックに基づくインデックス情報のフィードバックを行う手法が提案手法を上回るものの、フィードバック情報量の許容量を多くした場合、もしくは、受信アンテナ数を4とした場合に、提案手法の特性が最も良好となることを明らかにした。

第5章では、下りリンクマルチユーザMIMOシステムについて、基地局における送信ウェイト生成法について検討を行い、各ユーザからフィードバックされた送信最大比合成ウェイトベクトルに

Gram-Schmidt の正規直交化を適用する方法を提案した。計算機シミュレーションにより、提案手法は、基地局でシステム全体のチャネル情報が必要となる従来手法とほぼ同等の特性が得られることを明らかにした。

第 6 章では、下りリンクマルチユーザ MIMO システムにおいて、送信アンテナ毎、もしくは、基地局毎の送信電力制限を考慮した送信電力配分最適化問題を内点法により解く方法について検討し、目的関数の収束速度向上ならびに内点法の計算量削減を実現するため、内点法に係わる重要なパラメータ設定法を提案した。計算機シミュレーションにより、提案手法は計算量削減効果が大きく、かつ、基本的な内点法により算出した送信電力配分値との誤差が 0.5% 未満に収められることを明らかにした。

第 7 章では、基地局間協調 MIMO 送信の実現に向けた LTE-Advanced 下りリンクにおけるチャネル品質測定用参照信号 (Reference Signal) の構成方法として、複数基地局からのチャネルを高精度に推定するために、ある基地局が RS を送信するリソースに対し、他の基地局は信号を送信しないリソースを設けるという方法について検討した。無送信リソースの増加に伴う CSI 推定精度向上とオーバーヘッド増加に伴うピークレート低下の関係性について言及し、計算機シミュレーションにより、協調基地局数 3 の場合、隣接する 2 基地局において無送信リソースを設けることでスループット特性の向上は飽和することを明らかにした。

第 8 章では、LTE-Advanced 下りリンクにおいてセル端のユーザスループットを改善する方法として検討されている、受信器の持つ余剰の空間自由度を効果的に利用してセル間干渉を抑圧する Interference Rejection Combining (IRC) 受信技術について、その有効性を明らかにした。具体的には、セル間干渉抑圧効果が得られる領域のみにて IRC 受信を行うため、送信ストリーム数、及び、変調方式・符号化率に基づき、従来の最小二乗誤差規範に基づく受信法との動的切替法を提案し、効果的に切り替えられることを計算機シミュレーションにより明らかにした。また、IRC 受信ウェイトを構成する干渉信号成分を含む共分散行列に対し、RS に基づく推定法を適用することにより、セル間干渉抑圧効果が得られる領域を拡張させる点で効果的であることを示した。さらに、受信器からの CSI フィードバックを必要としない開ループ型送信ダイバーシチを適用した際の IRC 受信器に関して、参照信号に基づく共分散行列推定法の適用方法を提案した。計算機シミュレーションにより、受信アンテナ数 2、かつ、干渉波が受信器の自由度を超えて到来する場合、提案法を用いた IRC 受信器はセル間干渉を効果的に抑圧することが可能であり、従来の受信器と比較してスループット特性を改善できることを明らかにした。最後に、共分散行列推定に用いる RS がセル間にて衝突する際に IRC 受信器が受ける影響について検討した。送受信アンテナ数 2 を想定した計算機シミュレーションにより、RS のセル間衝突が生じた場合においても、IRC 受信器は従来の受信器と比較してスループット特性を改善可能であることを明らかにした。

第 9 章は結論であり、本研究で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	特任教授	小柴正則
副査	准教授	大鐘武雄

学位論文題名

MIMO無線伝送における送受信方法に関する研究

(Study on Transmission and Reception Techniques in MIMO Wireless Communications)

スマートフォンの普及が急激に進んでいる携帯電話システムは、第 3.9 世代と呼ばれる LTE (Long Term Evolution) の実用化が 2010 年末に始まって以来、高速なデータ伝送への需要が高まっている。国際電気通信連合では、すでに第 4 世代移動通信システム (4G) の検討が開始されており、下りリンクにおいて高速移動時で 100Mbps、歩行などの低速移動時には 1Gbps という高速なピークレートの達成が要求されている。携帯電話の標準化プロジェクトでは、LTE の拡張版である LTE-Advanced を 4G として見据え、すでに基本仕様の標準化が終了するに至っている。

LTE では、通信容量増大の鍵となる技術として、Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 送受信伝送技術が採用されている。しかし、近年のスマートフォンの普及による無線トラヒックの急激な増大により、LTE-Advanced 及びそれ以降の移動通信システムにおいて、さらに高度化した MIMO 技術が必要とされている。このような背景から、高度化 MIMO 技術、並びに、これを実現するための要素技術の検討が必要であると考えられる。

本論文は、MIMO 送受信伝送技術に着目し、将来の移動通信システムにおける通信容量の増大を目的とした送信側信号処理、及び、セル端近傍のユーザスループットの改善を目的とした受信側信号処理について、その要素技術に関する研究をまとめたものである。第 1 章は序論であり、研究の背景と本論文の概要について述べている。

第 2 章、及び、第 3 章では、従来技術の概観を目的として、MIMO システムの送信側と受信側の基本的な処理技術、及び、LTE 並びに LTE-Advanced に関する主要技術を解説している。

第 4 章では、MIMO 送信技術として、固有ビーム空間分割多重方式適用時の OFDM シス

テムにおける、チャネル情報フィードバック量の削減手法について検討している。具体的には、主要な時間領域チャネル成分のみを効率良くフィードバックする方法を新たに提案し、従来手法であるコードブックに基づくインデックス情報のフィードバックを行う手法よりも、提案手法の特性が良好となることを明らかにしている。

第5章では、下りリンクマルチユーザ MIMO システムについて、基地局における送信ウェイト生成法について検討を行い、各ユーザからフィードバックされた送信最大比合成ウェイトベクトルに正規直交化を適用する方法を新たに提案している。計算機シミュレーションにより、一部のチャネル情報しか使用しない提案手法でも、システム全体のチャネル情報が必要となる従来手法とほぼ同等の特性が得られることを明らかにしている。

第6章では、下りリンクマルチユーザ MIMO システムにおいて、送信アンテナ毎、あるいは、基地局毎の送信電力配分最適化問題を内点法により解く手法について検討し、収束速度向上並びに計算量削減を実現するためのパラメータ設定法を提案している。提案手法は計算量削減効果が大きく、かつ、削減なしの場合と比較して誤差が 0.5% 未満に収められることを明らかにしている。

第7章では、基地局間協調 MIMO 送信の実現に向けた LTE-Advanced 下りリンクにおけるチャネル品質測定用参照信号の構成方法として、複数基地局からのチャネルを高精度に推定するために、複数基地局の参照信号が衝突しないよう無送信リソースを設ける方法について検討している。協調基地局数 3、かつ、隣接する 2 基地局の場合、無送信リソースを設けることでスループット特性の向上が飽和することを明らかにしている。

第8章では、LTE-Advanced 下りリンクにおいてセル端のユーザスループットを改善する方法として、受信器の持つ余剰の空間自由度を効果的に利用してセル間干渉を抑圧する Interference Rejection Combining (IRC) 受信技術を提案し、その有効性を検討している。受信アンテナ数 2、かつ、干渉波が受信器の自由度を超えて到来する場合、提案法を用いた IRC 受信器はセル間干渉を効果的に抑圧することが可能であり、従来の受信器と比較してスループット特性を改善できることを明らかにしている。

第9章は結論であり、本研究で得られた成果を要約している。

これを要するに、著者は、通信容量の増大を目的とした送信側信号処理、及び、セル端近傍のユーザスループットの改善を目的とした受信側信号処理について、将来の移動通信システムに極めて有効な要素技術を確立したものであり、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。