氏名	田岡秀和（たおか ひでかず）
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成２１年３月２５日
学位授与の根拠法規	学位規則第４条第１項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）電気・通信工学専攻
学位論文題目	移動無線通信における高効率マルチアンテナ信号伝送法の研究
指導教員	東北大学教授　安達　文幸
論文審査委員	主査　東北大学教授　安達　文幸　　東北大学教授　澤谷　邦男 東北大学教授　坪内　和夫

論文内容要旨

マルチアンテナ信号伝送（MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)信号伝送）は，移動無線通信システムにおいて複数の送受信アンテナを用いて信号伝送を行うことにより，限られた帯域幅を用いて収容ユーザ数（キャパシティ）の増大，伝送速度の向上を実現する技術であり，MIMO ビームフォーミング・MIMO ダイバーシチ・MIMO 多重の 3 種類に大別される．本論文は，広帯域符号分割マルチアクセス(W-CDMA: Wideband direct sequence Code Division Multiple Access)を用いる第 3 世代，および，直交周波数分割マルチアクセス(OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access)を用いる第 3 世代拡張システムおよび第 4 世代移動無線通信システムに適した高効率のマルチアンテナ信号伝送技術の実現を目的として，筆者がこれまでに行った一連の研究成果をまとめたものであり，全編 5 章から構成されている．

第 1 章は緒論であり，研究の背景と本論文の概要について述べている．

第 2 章では，第 3 世代の W-CDMA 回線交換方式を対象にした，収容ユーザ数（キャパシティ）の増大に有効な MIMO ビームフォーミングについて述べている．

まず，上りリンクにおける，Rake 合成後の平均 2 乗誤差最小(MMSE: Minimum Mean Squared Error)規範の全パス共通のアンテナウエイト生成法を提案している．提案法では，希望ユーザおよび干渉ユーザの平均的な到来方向(DOA: Direction Of Arrival)に対して，マルチパス数やパスの受信電力によらず，それぞれ，高精度なメインローブおよびヌルを向ける受信ビームパターンを生成し，Rake 合成後の平均受信信号電力対干渉および雑音電力比(SINR: Signal-to-Interference plus Noise power Ratio)を最大化する．高送信電力の干渉ユーザが存在する場合，4 受信アンテナ時においてユーザの所要平均送信電力を空間ダイバーシチ受信に比べて約 2.5 dB 改善できることを，室内実験結果および屋外実験結果より明らかにし

ている.

また，上りリンクの受信ビーム（アンテナウエイト）のメインローブの角度方向と上り/下りリンクのキャリア周波数比から算出される位相シフトを，上りリンクの受信アンテナウエイトに与える下りリンク送信ビーム生成法を提案している．提案法を用いることにより，希望ユーザの到来方向に対する送信アンテナ利得を増大することができ，その結果，6 送信アンテナ時において基地局の所要平均送信電力を，位相シフトを行わない場合に比べて約 1 dB 低減できることを室内実験により明らかにしている．これらの結果は，W-CDMA を用いる第 3 世代の MIMO ビームフォーミングのシステム設計に指針を与え，高度化を可能とする重要な成果である．

第 3 章では，OFDMA 無線アクセスを用いる第 3 世代拡張方式および第 4 世代方式のブロードバンドパケットアクセスを対象にした，セル端ユーザの伝送速度の増大およびセルカバレッジの増大を実現する，上り DOA 推定に基づく下りリンクの MIMO ビームフォーミング送信について述べている．

まず，事前検討として，上りリンクにおける高精度 DOA 推定法について提案している．提案法では，メインローブ方向が Y 度単位の複数の指向性ビーム受信により生成した 2 次元（時間・角度方向）電力遅延プロファイルに基づき，パスタイミングおよび DOA を同時に推定する．これにより，従来の各アンテナの遅延プロファイルの電力加算に基づく推定法に比べて遅延プロファイル生成における受信 SINR を増大し，低受信 SINR 環境における DOA 推定精度を改善することができる．提案法を用いる場合，マルチパス間の角度広がりに依存せず，DOA 推定誤差約 3 度以下，パスタイミング正検出確率 70% 以上の高精度 DOA・パスタイミング推定精度を実現できることを，計算機シミュレーション，室内および屋外実験により明らかにしている．

次に，2 次元電力遅延プロファイルに基づき推定した各パスの DOA から求めたステアリングベクトルの加算により，全パスを含むブロードなメインローブを生成する下りリンク送信ビーム生成法を提案している．提案法により，メインローブ方向の指向性利得は低減するものの，大きな周波数（パス）ダイバーシチ効果が得られ，8 送信アンテナ時に平均ブロック誤り率(BLER: Block Error Rate)が 10^{-2} を達成するために必要な所要平均受信電力を，受信電力最大のパスにメインローブを生成する従来法に比べて，2 dB 以上低減できることを室内および屋外実験により明らかにしている．さらに，空間分割多元接続(SDMA: Space Division Multiple Access)を行う場合に，前述のメインローブ制御に加えて，各ユーザからフィードバックされた受信品質（受信 SINR）情報を基に，干渉ユーザの DOA に対して MMSE 規範の下りリンク干渉抑圧制御を行う送信ビーム生成法を提案している．提案法により，従来の各送受信アン

テナ間のチャネル変動および雑音電力に基づく最適送信ビーム生成法に比べて，適用条件はアンテナ間のフェージング変動の相関が高い（マルチパスの角度広がりが小さい）場合に限定されるものの，各送受信アンテナ間のチャネル変動をフィードバックする必要なく，高精度な送信ビームを生成することができる．提案法を用いた場合，干渉抑圧制御を行わずメインローブのみ制御する場合に比べて，8 送信アンテナ時に平均 BLER が 10^{-2} を達成するための所要平均受信電力を約 2〜5 dB 低減できることを，室内および屋外実験により明らかにしている．これらの結果は，第 3 世代拡張方式および第 4 世代方式における MIMO ビームフォーミングのシステム設計に指針を与える重要な成果である．

第 4 章では，第 4 世代方式の OFDMA ブロードバンドパケットアクセスにおける，セル近傍ユーザの伝送速度の増大に有効な MIMO 多重伝送を用いたときの達成可能な周波数利用効率・ピーク伝送レートについて論じている．

まず，セルラ環境における周辺セル干渉を考慮した受信 SINR の最大値が，チャネル負荷が 75%の高トラヒック条件およびチャネル負荷が 20%の低トラヒック条件において，それぞれ，約 18 dB および 30 dB であることを，マルチセルを考慮したシステムシミュレーション評価により明らかにしている．次に，4 送受信アンテナ，および，12 送受信アンテナを用いる MIMO 多重伝送を適用することにより，高トラヒック条件下で，それぞれ，約 10 bit/sec/Hz および 20 bit/sec/Hz，低トラヒック条件下で，それぞれ，約 23 bit/sec/Hz および 50 bit/sec/Hz の周波数利用効率を達成可能であることを Shannon Capacity に基づく理論検討により示している．

さらに，100 MHz 帯域幅で 4 送受信アンテナ，16QAM 変調方式を用いる MIMO 多重伝送により 1 Gbps（周波数利用効率 10 bit/sec/Hz）のリアルタイムパケット信号伝送を，そして，12 送受信アンテナ，64QAM 変調を用いることにより，約 5 Gbps （周波数利用効率 50 bit/sec/Hz）のパケット信号伝送を世界で初めて屋外実験により示している．これらの研究成果は，1 Gbps 以上もの超高速伝送パケットサービスが移動無線通信で実現可能であることを実証した重要な成果である．

第 5 章では，第 2 章から第 4 章を総括して結論を述べている．

以上要するに，本論文では，第 3 世代，および第 4 世代移動無線通信システムにおいて，収容ユーザ数の増大，セルカバレッジの増大および，セル端，セル近傍のユーザ伝送速度の増大を実現するためのマルチアンテナ信号伝送法について提案し，その有効性および実現性を明らかにした．

本論文の第 2 章で対象とした W-CDMA の第 3 世代移動無線通信システムは，2001 年 5 月に商用サービスが開始されおり，2009 年 1 月現在，国内の全契約者の約 9 割が第 3 世代移動通信システムを利用し

ており，現在の移動無線通信システムの主流となっている．さらに，本論文の第 3 章で対象とした第 3 世代の拡張方式である LTE (Long Term Evolution)は，2008 年 12 月に，移動無線通信システムの標準化仕様策定グループである 3GPP (3rd Generation Partnership Project)において仕様策定が完了し，2010 年度頃の商用サービス開始を目標として世界中で研究開発が行われている．LTE によりピークの伝送速度が 100 Mbps 以上の更なる高速なデータ通信が可能になる．また，第 3 章および第 4 章で対象とした第 4 世代移動無線通信システムについても，2007 年 11 月に使用周波数が国際電気通信連合(ITU: International Telecommunication Union)の世界無線通信会議(WRC: World Communication Conference)で決定され，3GPP においても LTE-Advanced と称され仕様化に向けた検討が 2008 年 4 月より開始された．第 4 世代移動無線通信システムでは，下りリンクにおいて，ピークの伝送速度が 1 Gbps 以上の超高速伝送が要求条件の一つであり，今後，より活発な研究開発が行われるものと考えられる．

これらの次世代移動無線通信システムにおいて超高速伝送を実現するために，本論文で検討を行ったマルチアンテナ信号伝送技術は，今後ますます重要になってくる必須の技術であり，本論文における検討結果は，システム設計を行う際の指針を与えるものになると期待される．

論文審査結果の要旨

マルチアンテナ（MIMO）信号伝送は，複数の送受信アンテナを用いて信号伝送を行うことにより，限られた帯域幅を用いて超高速伝送を実現する技術である。本論文は，第 3 世代および第 4 世代移動無線通信方式における MIMO 信号伝送技術に関する一連の研究成果をまとめたものであり，全編 5 章からなる。

第 1 章は緒論である。

第 2 章では，第3世代方式の広帯域符号分割マルチアクセス（W-CDMA）回線交換を対象にした全パス共通のウエイト生成を用いるMIMOビームフォーミングを提案している。Rake合成後の平均2乗誤差最小(MMSE)規範により全パス共通の上りリンクウエイト生成を行えば，4受信アンテナ時に上りリンク所要平均送信電力を空間ダイバーシチ受信に比べて約2.5dB低減できることを，室内および屋外実験により明らかにしている。また，上りリンク受信ビームの主ビームの角度方向と上下リンクのキャリア周波数比とから算出される位相シフトを上りリンク受信ウエイトに与える下りリンク送信ビーム生成法を提案している。6送信アンテナを用いるとき，位相シフトを行わない場合に比べて基地局の所要平均送信電力を約1dB低減できることを室内実験により明らかにしている。これは，W-CDMAを用いる第3世代方式の高度化を可能とする重要な成果である。

第 3 章では，直交周波数分割マルチアクセス（OFDMA）を用いる第3世代拡張方式および第4世代方式におけるブロードバンドパケットアクセスを対象にした下りリンクMIMO送信ビームフォーミングを提案している。提案法では，まず指向性ビーム受信により生成した2次元（時間・角度方向）電力遅延プロファイルに基づきパスタイミングと到来方向（DOA）を同時推定し，各パスの推定DOAから求めたステアリングベクトルの加算により，全パスを含むブロードなメインローブを生成する。これにより，周波数ダイバーシチ効果が得られ，8送信アンテナ時の所要平均受信電力を受信電力最大のパスにメインローブを生成する従来法より2dB以上低減できることを室内および屋外実験により明らかにしている。さらに，各ユーザからフィードバックされた受信品質情報を基にMMSE規範の下りリンク干渉抑圧制御を行うことで，干渉抑圧制御を行わない場合に比べて所要平均受信電力を約2～5dB低減できることを室内および屋外実験により明らかにしている。

第 4 章では，第 4 世代方式のブロードバンドパケットアクセスにおける MIMO 多重伝送の周波数利用効率とピーク伝送レートについて論じている。12 送受信アンテナを用いる MIMO 多重伝送を適用すれば，周辺セル干渉の存在下で 50bps/Hz の周波数利用効率を達成可能であることを理論検討により示し，100MHz 帯域幅で 1Gbps を超える信号伝送を世界で初めて屋外実験により実証している。これらの研究成果は，1Gbps 以上もの超高速伝送パケットサービスが移動無線通信で実現可能であることを示した重要な成果である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は，第 3 世代および第 4 世代移動無線通信方式における MIMO 信号伝送法を提案し，その有効性および実現性を明らかにしたものであり，無線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって，本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。