

博士論文審査報告書

論文題目

無線 LAN システムにおける
高効率マルチユーザ MIMO に関する研究
A Study on High Efficiency Multiuser
MIMO for Wireless LAN Systems

申請者

村上	友規
Tomoki	MURAKAMI

情報理工学専攻 無線信号処理研究

2015 年 7 月

近年のスマートフォンに代表される高機能端末の急速な普及に伴い、移動通信ネットワークのトラフィック量は年々増加の一途を辿っている。このような移動通信トラフィックの急激な増加に対応するためには、無線通信システムにおける更なる高速化・大容量化の実現が急務の課題である。本課題解決のためのアプローチの一つのとして、無線 LAN(Local Area Network)システムによる移動通信トラフィックのオフロードが挙げられる。無線 LAN のオフロードを確実に効果的に実現するためには、大量の移動通信トラフィックを安定的に収容できる無線信号処理機構が必須であり、それに対して、これまで、「帯域幅の拡大」と「空間多重数の増加」といった 2つのアプローチが主に検討されてきた。ここで、利用できる電波資源に限りがあることを考慮すると、「帯域幅の拡大」よりもむしろ、「空間多重数の増加」に資する技術的方策の検討をより一層推進することが極めて重要と考えられる。

「空間多重数の増加」に資する無線信号処理技術としては、まず、シングルユーザ MIMO(SU-MIMO: Single User MIMO)伝送が挙げられる。ところが、SU-MIMO では、空間多重数が AP(Access Point)もしくは端末のうち、少ない方のアンテナ数に制限されることから、アンテナ数が少ない端末と無線通信を行う形態の多い無線 LAN では、複数アンテナを有する AP の空間多重能力を活かすことが困難となる。一方、マルチユーザ MIMO(MU-MIMO: Multiuser Multiple Input Multiple Output)伝送では、複数のアンテナを有する AP が送信ビームフォーミングを行うことにより、アンテナ数が少ない複数の端末との同時伝送を実現できることから、AP の空間多重の能力を十分に発揮することができ、AP のアンテナ数に比例した収容トラフィックの大容量化が期待できる。しかしながら、MU-MIMO 伝送を現実的な無線通信システムへ適用する場合、「アンテナ間の相関問題」と「伝搬チャネル情報(CSI: Channel State Information)取得のためのオーバヘッド問題」に起因して、MU-MIMO 伝送の空間多重能力が低下する問題がある。

本論文の筆者は、MU-MIMO 伝送を現実的な無線通信システムに適用した場合に生じる上記 2つの問題点に着目し、その解決方法を提案するとともに、提案方式の有効性を実験的に取得した電波伝搬環境に基づく計算機シミュレーションにより明らかにした。

本論文は、5章から構成されており、以下各章の概要を述べ、評価を加える。

第 1章では、本研究の背景と目的を明らかにするとともに、本論文の概要について述べている。

第 2章では、「アンテナ間の相関問題」を解決すべく、端末側に複数のアンテナを想定し、受信アンテナ選択、あるいは受信ウエイト指定を行う MU-MIMO 伝送法を提案している。これまでに、すべての端末の組み合わせの中から周波数利用効率が最大となる組み合わせを選択することにより、アンテナ間の相関の低減を図る方式が提案されているが、アンテナ間相関の低い端末が優先され、

アンテナ間相関の高い端末が選択されにくくなることから、伝送遅延の増加が問題となる。提案する受信アンテナ選択法では、AP が最大の周波数利用効率となるように各端末の受信アンテナを選択し、選択された受信アンテナに対して MU-MIMO 伝送を行うものである。一方、受信ウエイト指定法では、AP により指定された受信ウエイトに基づき、受信信号を合成することを前提とし、指定した受信ウエイトを考慮した送信ビームフォーミングによって MU-MIMO 伝送を行うものである。さらに、受信ウエイト指定法では、送信ウエイトおよび受信ウエイトを反復更新することにより、各端末の受信電力を増加させることも可能である。IEEE.802.11ac を想定し、1 台の AP と複数の端末で構成される単一セルを対象とした計算機シミュレーションによる特性評価の結果、受信ウエイト指定法の周波数利用効率の累積分布の中央値は、CNR=30dB において、1 端末あたり平均して 10bit/s/Hz に達し、通常の CSMA/CA に基づく SU-MIMO 伝送よりも、1 端末あたり周波数利用効率を 5bit/s/Hz、受信アンテナ選択法よりも 1bit/s/Hz 改善できることを明らかにしている。なお、両提案方式ともに、現実的な無線 LAN システムに適用することを想定すると、AP が選択したアンテナ情報や指定した受信ウエイト情報を各端末に通知する必要性が生じ、この情報通知に伴うオーバーヘッドが周波数利用効率の低下を招くものと考えられる。そこで、アンテナ情報通知のオーバーヘッド削減を目的とした受信アンテナ判定法も併せて提案している。提案方式は、受信アンテナ選択型 MU-MIMO 伝送を対象として、送信ビームフォーミングが施された、わずか数シンボルのアンテナ判定用信号を AP 側で生成し、端末側では、各アンテナの受信電力を比較することにより、AP が選択したアンテナを判定するものである。特性評価の結果、提案方式により、受信アンテナ判定の正解率をほぼ 100% にできることを明らかにしている。提案方式は、MU-MIMO 伝送の空間多重効果を低下させるアンテナ相関の問題を、近年の端末の複数アンテナ化の動向を追い風に、端末側のアンテナ選択あるいはアンテナ合成により解決したものであり、無線 LAN システムのフレームフォーマット等の仕様を変更することなく、周波数利用効率を大幅に改善できる点が実用的な観点から評価できる。なお、本章で示した提案の内容および特性評価の結果は、今後の無線 LAN システムにおける AP の高密度置局環境を想定した次章の提案のベースとなるものである。

第 3 章では、第 2 章に続き「アンテナ間の相関問題」について、第 2 章で提案した受信アンテナ選択、あるいは受信ウエイト指定を行う MU-MIMO 伝送法を現実的なシステム形態として考えられる複数セルに適用するとともに、その有効性を CNR がおよそ 30dB~50dB の間で推移する、屋内複数セル環境で取得した実験データを用いて評価している。具体的には、セル間干渉を低減しながら所望の端末に同時送信を行う AP 連携 MU-MIMO 伝送に受信アンテナ選択法と受信ウエイト指定法の適用を図るものである。2 セルに 8 端末が存在す

る複数セル環境を想定した特性評価の結果，受信ウェイト指定法の周波数利用効率の累積分布の中央値は，システム全体で 90bit/s/Hz に達し，通常の CSMA/CA に基づく SU-MIMO 伝送よりも，周波数利用効率を 20bit/s/Hz，受信アンテナ選択法よりも 6bit/s/Hz 改善できることを明らかにしている．第 2 章で述べた基本となる提案を，近年の無線 LAN 需要の高まりに伴い，現実的に想定される複数セルへの適用に発展させた点は評価できる．

第 4 章では，「CSI 取得のためのオーバヘッド問題」を解決すべく，MU-MIMO 伝送と OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)伝送の切替法を提案している．MU-MIMO 伝送は，送信ビームフォーミングを行うために，CSI を端末から AP 側にフィードバックする必要がある．このフィードバック情報は，端末数に比例して増加することから，MU-MIMO 伝送の周波数利用効率低下の主たる要因となる．提案方式は，CSI 取得が必要となる MU-MIMO 伝送と CSI を必要とせず，常に端末に対して固定的な帯域を割り当てる OFDMA 伝送を，事前に CSI に関わるオーバヘッド，データ長，端末数等を考慮して，適応的に切り替えるものである．特性評価の結果，提案方式のスループットは，短パケットの場合にはオーバヘッドの小さい OFDMA 伝送を単独で用いた場合のスループットに一致し，長パケットの場合にはオーバヘッドの大きい MU-MIMO 伝送を単独で用いた場合のスループットに一致することから，提案方式により，パケット長にかかわらず，高いスループットの実現が可能となることを明らかにしている．MU-MIMO 伝送のオーバヘッド問題を，MU-MIMO 伝送と OFDMA 伝送における所要オーバヘッドの差異に着目し，伝送効率を規範として，両伝送方式を適切に融合させることにより解決したものであり，周波数のさらなる有効利用を図ることができるだけでなく，MU-MIMO 伝送と OFDMA 伝送とを融合したシステムを指向する次世代無線 LAN の標準化にも貢献できる可能性がある．

第 5 章では，本研究において得られた成果を総括している．

以上を要するに，本研究では，無線 LAN システムの高速化・大容量化の鍵を握るマルチユーザ MIMO 伝送を採り上げ，それが有する 2 つの技術課題を克服できる独創性の高い数々の提案を行い，基礎段階から実用段階に至る貴重で有効な知見を得ている．筆者の研究成果は，広帯域無線通信技術分野の発展に大きく貢献するものと考えられる．よって本論文は，博士（工学）早稲田大学の学位論文として価値あるものと認める．

2015年7月

審査員

主査	早稲田大学教授	博士（工学）（早稲田大学）	前原 文明
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	高畑 文雄
	早稲田大学教授	博士（工学）（東京大学）	甲藤 二郎