

博士論文概要

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 5 月

本論文は、無線 LAN(Local Area Network)システムにおけるマルチユーザ MIMO(MU-MIMO: Multiuser Multiple Input Multiple Output)伝送の周波数利用効率の改善について検討した成果であり、第 1 章から第 5 章で構成される。

第 1 章では、研究の背景、課題と目的を述べる。無線通信デバイスの普及により急増する移動通信トラフィックを安定的に収容するためには、無線通信システムの高速度が必須であり、次世代セルラシステムや移動通信トラフィックのオフロードの役割を担う次世代無線 LAN システムの検討が進められている。本研究で注目する無線 LAN システムでは、これまでに「帯域幅の拡大」と「空間多重数の増加」によって高速化を行ってきた。さらなる高速化に向けては、近年の周波数の逼迫状況を考慮すると、「帯域幅の拡大」には限界があることから、MIMO 伝送を用いた「空間多重数の増加」が期待されている。しかし、従来技術であるシングルユーザ MIMO(SU-MIMO: Single User MIMO)伝送の空間多重数は、アクセスポイント(AP: Access Point)もしくは端末の少ないアンテナ数に制限される。つまり、スマートフォンのようにアンテナ数が少ない端末と無線通信を行う場合、複数アンテナを有する AP の空間多重の能力を十分に活かすことができない。一方、最新技術である MU-MIMO 伝送の場合、AP の送信ビームフォーミングにより端末間干渉を抑圧することで複数端末と同時伝送を行うことから、AP の空間多重の能力を十分に発揮することができる。従って、AP のアンテナ数の増加に応じて空間多重数の増加が期待できる。しかし、MU-MIMO 伝送を実システムに適用する場合、「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」によって、MU-MIMO 伝送の周波数利用効率が低下する。本研究では、上記課題の解決を目的として、空間多重数の増加を最大限に発揮するための高効率 MU-MIMO 伝送について検討する。

第 2 章では、「アンテナ間の相関問題」について、複数アンテナを有する端末に対する MU-MIMO 伝送を提案し、その有効性を述べる。MU-MIMO 伝送の周波数利用効率は、アンテナ間の相関に大きく依存することが知られており、アンテナ間相関の低減は重要な課題である。これまでに AP が有する複数アンテナから最大の周波数利用効率となるアンテナの組合せを選択する MU-MIMO 伝送や複数端末から最大の周波数利用効率となる端末の組合せを選択する MU-MIMO 伝送が検討されている。上記伝送法の適用によって周波数利用効率の改善が期待できるが、周波数利用効率の最大値の低下や伝送遅延の分散値の増加などの新たな課題が発生する。そこで、本研究では、将来的に端末のアンテナ数が増加することを想定し、上記伝送法とは異なるアプローチとして、複数アンテナを有する端末に対する受信アンテナ選択型 MU-MIMO 伝送と受信ウェイト指定型 MU-MIMO 伝送を提案する。まず、受信アンテナ選択型 MU-MIMO 伝送では、

AP が最大の周波数利用効率となる各端末の受信アンテナの組合せを選択し、選択した受信アンテナに対して MU-MIMO 伝送を行う。一方、受信ウエイト指定型 MU-MIMO 伝送では、AP が各端末の受信ウエイトを指定することで各端末において受信信号の合成を行うことを前提とし、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。さらに、受信ウエイト指定型 MU-MIMO 伝送では、送信ウエイトと受信ウエイトを反復更新することで各端末の受信電力を徐々に増加させることを特徴として有する。しかし、提案法を実システムに適用する場合、各端末は MU-MIMO 伝送の前に選択された受信アンテナ情報や指定された受信ウエイト情報を把握する必要がある、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。そこで、本研究では、受信アンテナ選択型 MU-MIMO 伝送について、アンテナ情報通知のオーバーヘッドを削減する受信アンテナ判定法を提案する。提案法では、送信ビームフォーミングが施されたアンテナ判定用信号に対して、端末自身が各アンテナで受信される信号の受信電力の比較結果から受信電力が小さいアンテナを AP が選択したアンテナと判定する。アンテナ判定用信号は数シンボルで実現できることから、オーバーヘッドの削減が可能となる。提案法の有効性を明らかにするための評価において、従来法である CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)に基づく SU-MIMO 伝送と比較して、受信アンテナ選択型 MU-MIMO 伝送の端末毎の周波数利用効率は 4bit/s/Hz 高く、受信ウエイト指定型 MU-MIMO 伝送は 5bit/s/Hz 高くなることがわかった。以上より、提案法は、従来法と比較して高い周波数利用効率を実現できることが明らかとなった。さらに、受信アンテナ判定法の評価では、提案法は、端末数に依存しない少量のオーバーヘッドで実現できること、さらに、受信アンテナ判定を考慮したアンテナ選択を適用することで、受信アンテナ判定の正解率はほぼ 100%に達し、概ね上限値と同等の端末毎の周波数利用効率を実現できることがわかった。以上より、受信アンテナ判定法は、オーバーヘッド削減に有効であることが明らかとなった。

第 3 章では、第 2 章に引き続き「アンテナ間の相関問題」について、第 2 章の提案法を複数セルに拡張し、その有効性を述べる。近年、無線 LAN システムの需要の高まりに伴い、様々な場所での AP の設置が進んでいる。しかし、AP の過剰な設置は、通信セル間の干渉を増加させ、システム全体の周波数利用効率の低下要因となる。MU-MIMO 伝送に用いる送信ビームフォーミングは、所望端末に対する干渉だけでなく隣接する通信セルの端末に対する干渉も抑圧できることから、複数セルに対して MU-MIMO 伝送を適用した AP 連携 MU-MIMO 伝送が検討されている。技術の汎用性や拡張性を考慮した場合、単一セルだけでなく複数セルに対しても技術展開できることは非常に重要である。そこで、本研究では、第 2 章の提案法を複数セルに拡張した受信アンテナ選択型 AP 連携 MU-MIMO 伝送

と受信ウェイト指定型 AP 連携 MU-MIMO 伝送を検討する。提案法の有効性を示すための評価において、受信ウェイト指定型 AP 連携 MU-MIMO 伝送のシステム全体の周波数利用効率は、従来法である CSMA/CA に基づく MU-MIMO 伝送よりも 20bit/s/Hz 高く、受信アンテナ選択型 AP 連携 MU-MIMO 伝送よりも 6bit/s/Hz 高いことがわかった。以上より、第 2 章の提案法を複数セルに拡張できること、および提案法は従来法と比較して高いシステム全体の周波数利用効率を実現できることが明らかとなった。

第 4 章では、「CSI 取得のためのオーバーヘッド問題」について、MU-MIMO 伝送と OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)伝送の切替法を提案し、その有効性を述べる。MU-MIMO 伝送では、AP が送信ビームフォーミングを行うために事前に CSI を取得する必要がある。無線 LAN 標準規格で策定された CSI の取得方法では、AP から送信する CSI 推定用信号を端末が受信し、各端末がその受信信号から推定した CSI を AP にフィードバックすることで取得する。しかし、この情報通知がオーバーヘッドとなるため、MU-MIMO 伝送の周波数利用効率が低下する。そこで、本研究では、CSI 取得が必要である MU-MIMO 伝送と CSI 取得を必要としない OFDMA 伝送を適応的に切り替える伝送法を提案する。提案法の特徴は、事前に CSI 取得に係わるオーバーヘッド、データ長、端末数などを考慮した MU-MIMO 伝送と OFDMA 伝送のスループットを算出し、スループットが高い伝送法を選択することにある。また、次世代無線 LAN 標準規格では、OFDMA 伝送の導入に向けた議論が進められており、本提案法の無線 LAN システムへの適用が期待される。まず、オーバーヘッドを考慮した MU-MIMO 伝送と OFDMA 伝送のスループット評価において、各伝送法のスループットの優劣は、AP の余剰アンテナに大きく依存することがわかった。具体的には、余剰アンテナが存在する場合には、MU-MIMO 伝送の通信品質を高めることから、オーバーヘッドを考慮しても MU-MIMO 伝送が優位となることがわかった。一方、余剰アンテナが存在しない場合には、搬送波の信号電力対雑音電力比(SNR: Signal to Noise power Ratio)とデータ長によって、OFDMA 伝送と MU-MIMO 伝送の優劣が変化することがわかった。特に、SNR が低く、データ長が短い環境では、OFDMA 伝送が優位となることがわかった。次に、提案法の有効性を示すための評価において、提案法を適用することで、データ長が短い場合(0.5ms)にはスループットが 1.33 倍高くなり、データ長が長い場合(3ms)には 1.37 倍高くなることがわかった。以上より、提案法は MU-MIMO 伝送と OFDMA 伝送を単独で用いる従来法と比較して高いスループットを実現できることが明らかとなった。

第 5 章では、第 2 章から第 4 章で得られた評価結果より、提案の高効率 MU-MIMO 伝送が従来法と比較して高い周波数利用効率を実現できることを示し、提案法の無線 LAN システムへの適用性と無線 LAN における有効性を結論づける。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 村上 友規 印

(2015年 7月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	坂田佳謙, 村上友規, 鷹取泰司, 溝口匡人, 前原文明, “MU-MIMO-OFDMA 伝送における不均一なトラヒック及び受信電力を考慮したリソース割り当て法,” 信学論 B, vol.J98-B, no.7, pp.707-716, 2015年7月.
論文	H. Fukuzono, T. Murakami, K. Riichi, Y. Takatori, and M. Mizoguchi, “Weighted-combining calibration on multiuser MIMO systems with implicit feedback,” IEICE Transaction on Communications, vol.E98-B, no.4, pp.701-713, Apr. 2015.
論文	K. Ishihara, T. Murakami, Y. Asai, Y. Takatori, and M. Mizoguchi, “Cooperative inter-cell interference mitigation scheme with downlink MU-MIMO beamforming for dense wireless LAN environment,” Wireless Personal Communications, Springer, Dec. 2014.
○論文	村上友規, 工藤理一, 鷹取泰司, 溝口匡人, 前原文明, “複数アンテナを有する端末に適した AP 連携マルチユーザ MIMO 伝送法,” 信学論 B, vol.J97-B, no.7, pp.515-524, 2014年7月.
○論文	T. Murakami, Y. Takatori, M. Mizoguchi, and F. Maehara, “A cross-layer switching of OFDMA and MU-MIMO for future WLAN systems,” IEICE Communications Express, vol.3, no.9, pp.263-268, Sept. 2014.
論文	浅井裕介, 石原浩一, 村上友規, 工藤理一, 市川武男, 鷹取泰司, 溝口匡人, “超高速無線 LAN 規格 IEEE802.11ac の概要とマルチユーザ MIMO の実験的検証,” 信学論 B, vol.97-B, no.1, pp.1-18, Jan. 2014.
論文	T. Murakami, K. Ishihara, K. Riichi, Y. Asai, T. Ichikawa, and M. Mizoguchi, “Implementation and evaluation of real-time distributed zero-forcing beamforming for downlink multi-user MIMO systems,” IEICE Transaction on Communications, vol.E96-B, no.10, pp.2521-2529, Oct. 2013.
論文	T. Murakami, H. Fukuzono, Y. Takatori and M. Mizoguchi, “Multiuser MIMO with implicit channel feedback in massive antenna systems,” IEICE Communication Express, vol.2, no.8, pp.336-342, Aug. 2013.
論文	T. Murakami, K. Riichi, T. Ichikawa, N. Honma, and M. Mizoguchi, “Performance evaluation of interference-aware multi-cell beamforming for an overlapping cells environment,” IEICE Transaction on Communications, vol.E96-B, no.6, pp.1492-1501, June 2013.
論文	K. Nishimori, N. Honma, T. Murakami, and T. Hiraguri, “Effectiveness of relay MIMO transmission by measured outdoor channel state information,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.60, no.2, pp.615-623, Feb. 2012.
論文	R. Kudo, Y. Takatori, K. Nishimori, T. Ichikawa, T. Murakami, M. Mizoguchi, and M. Morikura, “Spatial domain resource sharing for overlapping cells in indoor environment,” International Journal of Digital Multimedia Broadcasting, vol.2010, Article ID 642542, Dec. 2009.
○国際会議	T. Murakami, Y. Takatori, M. Mizoguchi, and F. Maehara, “Antenna decision method for downlink multiuser MIMO systems with receive antenna allocation,” Proc. of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, July 2015.
国際会議	Y. Sakata, T. Murakami, Y. Takatori, M. Mizoguchi, and F. Maehara, “Simple resource allocation scheme for heterogeneous traffic in MU-MIMO-OFDMA systems,” Proc. of Asia-Pacific Conference on Communications, Oct. 2014.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国際会議	H. Fukuzono, T. Murakami, R. Kudo, S. Shinohara, Y. Takatori, and M. Mizoguchi, "Combining calibration schemes on a real-time multiuser MIMO-OFDM system with implicit feedback," Proc. of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Sept. 2014.
国際会議	N. Shibata, T. Murakami, K. Ishihara, T. Kobayashi, J. Kani, J. Terada, M. Mizoguchi, Y. Miyamoto, and N. Yoshimoto, "256-QAM 8 wireless signals transmission with DSP-assisted analog RoF for mobile front-haul in LTE-B," Proc. of OptoElectronics and Communication Conference, July 2014.
国際会議	H. Kimura, T. Murakami, K. Ishihara, T. Kobayashi, N. Iiyama, K. Asaka, S. Kimura, M. Mizoguchi, Y. Miyamoto, and N. Yoshimoto, "First demonstration of burst-mode upstream transmission for digital coherent OFDMA-PON," Proc. of OptoElectronics and Communication Conference, July 2014.
国際会議	H. Fukuzono, T. Murakami, R. Kudo, Y. Takatori, and M. Mizoguchi, "Combining calibration schemes for implicit feedback beamforming on multiuser MIMO systems," Proc. of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Sept. 2013.
国際会議	M. Saito, N. Honma, T. Murakami, and Q. Chen, "Evaluation of inter-cell interference suppression using tunable beam-width microstrip antenna in actual indoor environment," Proc. of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, July 2013.
国際会議	K. Ishihara, T. Murakami, Y. Asai, and M. Mizoguchi, "Selective beamforming for inter-cell interference mitigation in coordinated wireless LANs," Proc. of Wireless Personal Multimedia Communications, June 2013.
国際会議	T. Murakami, K. Ishihara, R. Kudo, N. Honma, and M. Mizoguchi, "Cooperative interference management by beam tilt and power controls in an indoor multi-cell environment," Proc. of European Conference on Antennas and Propagation, Apr. 2013.
国際会議	K. Hayashi, Y. Fujishima, M. Kaneko, H. Sakai, R. Kudo, and T. Murakami, "Self-interference canceller for full-duplex radio relay station using virtual coupling wave paths," Proc. of IEEE Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference, Dec. 2012.
国際会議	T. Murakami, K. Ishihara, R. Kudo, Y. Asai, T. Ichikawa, and M. Mizoguchi, "Experimental evaluation of distributed ZF beamforming in an indoor multi-cell environment," Proc. of Asia-Pacific Conference on Communications, Oct. 2012.
国際会議	R. Kudo, K. Ishihara, T. Murakami, B.A.H.S. Abeysekera, and M. Mizoguchi, "Successive optimization transmission for high and low SNR stations in wireless LAN systems," Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference Fall, June 2012.
国際会議	T. Murakami, R. Kudo, Y. Asai, T. Kumagai, and M. Mizoguchi, "Performance evaluation of distributed multi-cell beamforming for MU-MIMO systems," Proc. of IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems, Nov. 2011.
国際会議	N. Honma, T. Murakami, M. Mizoguchi, and Y. Tsunekawa, "Effect of antenna spacing on inter-cell interference in wireless LAN using transmitting beam forming," Proc. of International Symposium on Antennas and Propagation, Oct. 2011.
国際会議	R. Kudo, Y. Takatori, T. Murakami, and M. Mizoguchi, "User selection for multiuser MIMO systems based on block diagonalization in wide-range SNR environment," Proc. of IEEE International Conference on Communications, June 2011.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国際会議	T. Murakami, R. Kudo, T. Ichikawai, and M. Mizoguchi, "Performance evaluation of primary-secondary transmission in actual indoor environments," Proc. of International Symposium on Antennas and Propagation, Nov. 2010.
国際会議	T. Murakami, N. Honma, K. Nishimori, R. Kudo, Y. Takatori, and M. Mizoguchi, "Multi site MIMO channel analysis at 4.85GHz in outdoor environment," Proc. of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Sept. 2009.
技術誌	石原浩一, 村上友規, "無線 LAN におけるマルチユーザ MIMO の標準化動向と伝送装置の開発," 電子情報通信学会誌, vol.97, no.4, pp.302-306, Apr. 2014.
技術誌	市川武男, 石原浩一, 村上友規, B.A.H.S. Abeysekera, 浅井裕介, 鷹取泰司, 溝口匡人, "ワイヤレスホームネットワークを実現する高速無線 LAN," NTT 技術ジャーナル, vol.25, no.1, pp.18-22, Jan. 2013.
研究会	村上友規, 鷹取泰司, 溝口匡人, 前原文明, "サブキャリア単位のアンテナ割り当てを用いたマルチユーザ MIMO におけるアンテナ決定法," 信学技報, AP2014-128, 2014 年 11 月.
研究会	村上友規, 工藤理一, 鷹取泰司, 溝口匡人, 前原文明, "複数アンテナを有する端末に対する受信ウエイトを指定するマルチユーザ MIMO 伝送法," 信学技報, RCS2014-82, 2014 年 6 月.
研究会	氏原圭亮, 村上友規, 坂田佳謙, 鷹取泰司, 溝口匡人, 前原文明, "チャンネル推定誤差を考慮した複数アンテナを有する端末に対するマルチユーザ MIMO 伝送の特性評価," 信学技報, RCS2014-41, 2014 年 6 月.
研究会	坂田佳謙, 村上友規, 鷹取泰司, 溝口匡人, 前原文明, "MU-MIMO-OFDMA における不均一な受信電力を考慮したリソース割り当て法," 信学技報, RCS2013-339, 2014 年 3 月.
	その他(主著 7 件, 共著 10 件)
全国大会	工藤理一, 福園隼人, 村上友規, 溝口匡人, "大規模 MIMO システムの下り回線チャンネル情報推定," 信学総大, AT-2-2, 2015 年 3 月.
全国大会	鷹取泰司, 石原浩一, 村上友規, ヒラシタアベセーカラ, 松井宗大, 溝口匡人, "無線 LAN 稠密環境に適した分散スマートアンテナシステム," 信学総大, B-5-141, 2015 年 3 月.
全国大会	村上友規, 石原浩一, 鷹取泰司, 溝口匡人, "分散スマートアンテナにおける協調ゾーン形成法," 信学総大, B-5-142, 2015 年 3 月.
全国大会	村上友規, 福園隼人, 工藤理一, 鷹取泰司, 溝口匡人, "伝搬路の統計情報によるアナログビーム形成法を適用した複数局同時送信技術," 信学ソ大, BS-1-4, 2014 年 9 月.
全国大会	氏原圭亮, 坂田佳謙, 村上友規, 鷹取泰司, 溝口匡人, 前原文明, "複数アンテナを有する端末に適した MU-MIMO 伝送法," 信学総大, B-5-77, 2014 年 3 月.
全国大会	坂田佳謙, 村上友規, 鷹取泰司, 溝口匡人, 前原文明, "MU-MIMO-OFDMA における不均一な受信電力を考慮したリソース割り当て法," 信学総大, B-5-76, 2014 年 3 月.
	その他(主著 11 件, 共著 18 件)