

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760296

研究課題名(和文) MIMO技術を用いた大容量無線メッシュネットワーク

研究課題名(英文) Capacity enhancement of wireless mesh networks using MIMO technology

研究代表者

岡田 啓 (Okada, Hiraku)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授

研究者番号：50324463

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、各ノード間を無線により接続し、自律分散的にネットワークを構築する無線メッシュネットワークのMIMO (Multi-Input Multi-Output)技術による大容量化を検討した。サブテーマ「MIMOメッシュネットワークのための送信レート制御」では、通信路状態の変化を検出する手法を提案することで適切に送信レートを制御することができ、スループット特性を向上することができた。また、サブテーマ「マルチユーザMIMOを用いた無線メッシュネットワーク」では、面的伝送効率という新しい評価指標を提案し、これによりマルチユーザMIMOがメッシュネットワークで有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：This research subject has investigated capacity enhancement of wireless mesh networks by using MIMO (multi-input multi-output) technology. In the sub-theme "transmission rate control for MIMO mesh networks," a detection method of a change of channel status is proposed, and the throughput is improved by the proposed method. In the sub-theme "wireless mesh networks using multi-user MIMO," a novel evaluation criteria, area transmission efficiency, is proposed, and effectiveness of multi-user MIMO is clarified by the area transmission efficiency.

研究分野：通信工学

キーワード：無線メッシュネットワーク MIMO スマートグリッド スマートコミュニティ 無線LAN

1. 研究開始当初の背景

電力系統の高度化を図るスマートグリッドが次世代送電網として注目を集めている。さらにその考え方を発展させたスマートコミュニティでは、エネルギーシステム、交通システム、情報ネットワークを融合した、快適で省エネな新たな街づくりを目指している。スマートグリッド・スマートコミュニティを実現する重要な構成要素の一つとして、コミュニティ内の情報を円滑に交換するための通信インフラが挙げられる。これを本研究ではコミュニティエリアネットワークと呼ぶ。コミュニティエリアネットワークでは電力系統管理のための情報に加え、交通システムや安全・安心な街づくりを支えるための地域に関する情報などが伝送される。通信メディアとして、移動体通信網、IEEE 802.11 無線 LAN を用いたメッシュネットワーク、IEEE 802.15.4 を用いたセンサネットワーク、電力線通信などが挙げられる。コミュニティエリアネットワーク形成のためには、ある一つの通信メディアのみが用いられる訳でなく、その環境や要求される通信品質に応じ、さまざまな通信メディアを選択・組み合わせ用いられる。例えば監視カメラからの動画画像も伝送可能な無線メッシュネットワークや、環境情報収集のための高信頼低速度センサネットワークなどが挙げられる。

本研究課題では、コミュニティエリアネットワーク形成のための一方式として無線メッシュネットワークに着目する。無線メッシュネットワークは、有線インフラや集中管理を行うサーバが存在しなくても、各ノード間を無線により接続し、自律分散的にネットワークを構築する技術である。ある地域に特化した通信インフラを提供することができ、地域情報を交換するためのコミュニティネットワークやセンサネットワークのバックボーンとしても用いることができる。自律分散的に動作することから大規模災害にも強い特徴を持つ。

応募者はこれまで無線メッシュネットワークに関して、理論解析を用いた基礎検討から、大規模テストベッドを用いた実験による検討、さらには実際にある地域にテストベッドを構築し、地域住民がモニターとして参加した実証実験も行っている。これまでの検討結果から、無線メッシュネットワークはコミュニティエリアネットワーク形成のために有効な手段であるが、動画画像を伝送したり、環境情報を収集するセンサネットワークのバックボーンとして用いる場合には容量が不足してしまうことが懸念される。

2. 研究の目的

本研究課題では MIMO (Multi-Input Multi-Output) 技術を用いた大容量無線メッシュネットワークの実現に向けた課題について検討する。MIMO 技術は送信ノードと受信ノードに複数のアンテナを用意し、これを

いて複数のストリームを同時に伝送することで大容量化を図る技術である。無線 LAN の規格である IEEE 802.11n では、この MIMO 技術の導入により最大で 4 ストリームを同時に伝送することができる。MIMO メッシュネットワークに関して以下の二つのサブテーマに取り組む。

(1) MIMO メッシュネットワークのための送信レート制御

MIMO の最大の特徴は複数のストリームを同時に伝送できることであるが、通信路の状態に合わせて伝送するストリーム数を適切に選択する必要がある。これに加え、従来の IEEE 802.11a/b/g のように、変調方式、誤り訂正符号の符号化率により送信レートが決まる。集中管理が可能な移動体通信網で用いられている MIMO 伝送方式では、受信機から通信路状態情報をフィードバックすることで送信レートを決定する。それに対し IEEE 802.11n では、事実上、受信ノードはフィードバック情報を返さない。一方、無線メッシュネットワークではノードは固定設置されるため、通信路状態の時間変動が少ない。そこで、伝送成否の履歴や各アンテナの受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) の変化を観測することで適切なストリーム数を選択し、送信レートを制御する手法を提案する。提案手法を実装し、実験により性能を評価する。

(2) マルチユーザ MIMO を用いた無線メッシュネットワーク

標準化が進められ、現在、その作業が終了している IEEE 802.11ac ではマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) が導入された。この MU-MIMO ではある一つの送信ノードから複数の受信ノードに対して複数のストリームを形成することができる。伝送効率が向上する。しかし、IEEE 802.11ac ではアクセスポイントからステーションへのダウンリンクでのみ定義されており、各ノードが相互接続されている無線メッシュネットワークにそのまま適用することができない。そこで、送信タイミングによって MU-MIMO を行う組を変え、送信ノードが複数の受信ノードに対して MU-MIMO 伝送を行うシステムを提案する。また、無線メッシュネットワークでは隠れ端末問題により、受信ノードにおいて他の送信ノードからのパケットと衝突が発生してしまう。MU-MIMO では複数の受信ノードが存在するため、この隠れ端末問題による影響が大きくなる可能性がある。理論解析およびシミュレーションによりこの影響を評価する。

3. 研究の方法

各サブテーマにおける研究の方法は以下の通りである。

(1) MIMO メッシュネットワークのための送

信レート制御

平成 24 年度は、MIMO メッシュネットワークにおける通信路の基本特性を得ることを目標に、送信レート、送信ストリーム数を変えながら、RSSI、スループットを測定した。そして、測定データを分析することでこれらの関係性を評価した。

平成 25 年度は、前年度の測定結果を基に MIMO メッシュネットワークのための送信レート制御方式を検討した。無線メッシュネットワークではノードは固定設置されるため、通信路状態の時間変動が少ない。そこで、通信路状態が変わらない間はある最適な送信レートをを用い、通信路状態が変化した場合に新たに最適な送信レートを探索する半固定レート方式を採用した。このとき、アンテナごとの RSSI の変化を観測することで通信路状態の変化を検出する手法を提案した。

平成 26 年度は、MIMO メッシュネットワークの状態監視技術について検討した。MIMO 技術は送信機と受信機の双方で複数のアンテナを利用することにより、伝送効率の向上を図っている。しかし、アンテナ数が増えることで、各リンクが持つ特徴量が增大する。さらに、空間多重を行うことで通信路の影響を受けやすくなり、リンクの性能が変化しやすくなる。このような理由から、ネットワークの安定した運用を行うためには、ネットワークの状態監視を行うことで安定した送信レートをを用いることが必要であると考えられる。そこで、テストベッドを用いてこの状態監視法の検討を行った。各ノードからスループット、RSSI などのリンク情報を収集し、SOM (Self-Organizing Map) を用いることで関連のあるリンクを見つけることを検討した。

(2) マルチユーザ MIMO を用いた無線メッシュネットワーク

平成 24 年度は、マルチユーザ MIMO (MU-MIMO) を用いた無線メッシュネットワークの基礎評価を行なった。まずは、送信タイミングによって MU-MIMO を行う組を変え、送信ノードが複数の受信ノードに対して MU-MIMO 伝送を行うシステムを提案した。そして各ノードの送信キューに蓄えられているパケットの数を状態としたマルコフモデルで表し、理論解析により MU-MIMO の性能を導出した。

平成 25 年度は、単一のノードに着目するのではなく、これを拡張してネットワークに複数のノードが存在することを想定して、MU-MIMO の性能を解析により求めた。無線メッシュネットワークでは隠れ端末問題により、受信ノードにおいて他の送信ノードからのパケットと衝突が発生してしまう。MU-MIMO では複数の受信ノードが存在するため、この隠れ端末問題による影響が大きくなる可能性がある。このことを考慮した性能評価手法として面的伝送効率を提案した。

平成 26 年度は、昨年度まで取り扱ってき

た送信 MU-MIMO に加え、受信 MU-MIMO を導入したときの面的伝送効率について評価した。送信 MU-MIMO では1つの送信ノードから複数の受信ノードへパケットを送信することができる。これに加え、受信 MU-MIMO では複数の送信ノードからのパケットを受信ノードにおいて、ある条件を満たせば正しく受信できる。これにより、より密にパケットを送受信することができる。条件を満たすようなノードの送受信パターンを考えて面的伝送効率を評価した。

4. 研究成果

各サブテーマにおける研究成果は以下の通りである。

(1) MIMO メッシュネットワークのための送信レート制御

送信レート、送信ストリーム数を変えながら、RSSI、スループットを測定し、その測定データを分析した結果、2.4GHz 帯、5GHz 帯の両方において RSSI とスループットに正の相関を持ち、ある程度大きな RSSI の変動とともにスループットを最大にする最適レートが変化する傾向があることが分かった。

この結果を基に、アンテナごとの RSSI の変化を観測することで通信路状態の変化を検出する手法を提案し、実験により性能を評価した。まずは他の要因により特性に影響が出にくいよう、一組の送受信ノードを用いたシングルホップ環境で実験を行った。その結果を図 1 に示す。通信路状態の変化を検出するための閾値を適切に設定することで、スループットが向上することを確認した。

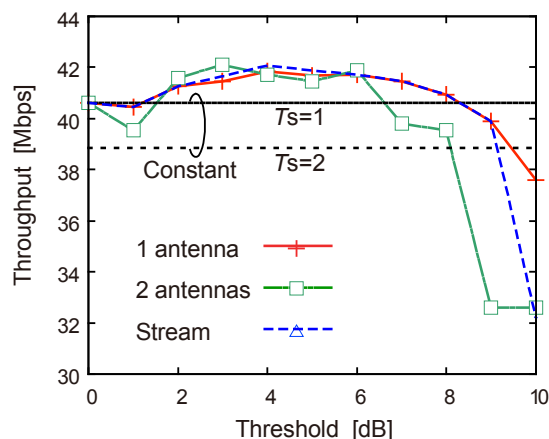


図 1 通信路状態の変化検出法のスループット特性

また、ネットワーク監視法の検討として、測定データに SOM を適用して分析した。その結果、関連のあるリンクを見つけることができ、状態監視に利用できる見込みが得られた。

(2) マルチユーザ MIMO を用いた無線メッシュネットワーク

MU-MIMO を適用した無線メッシュネットワ

ークの多重化効果を解析した結果、キューサイズが隣接ノード数に対してあまり大きくない条件で MU-MIMO の改善度が大きく、MU-MIMO は無線メッシュネットワークの性能向上に優れていることが分かった。また、従来のシングルユーザ MIMO (SU-MIMO) と MU-MIMO での隠れ端末からのパケット衝突の影響は同じであることを示した。

そして、隠れ端末問題を考慮した面的伝送効率による性能解析の結果を図2に示す。キューに蓄えられているパケット数が少ないときは多重化効果により MU-MIMO の方が特性が良い。しかし、蓄積パケット数が多いときは送信ノード密度を密にできないために、MU-MIMO の方が SU-MIMO よりも性能が劣った。これに対し、多重化するパケットの選択手法を改良した選択 MU-MIMO では、多重化効果および送信ノード密度の両方を高く維持でき、面的伝送効率を常に良くできることを示した。これにより、MU-MIMO が無線メッシュネットワークで有効であることを確認した。

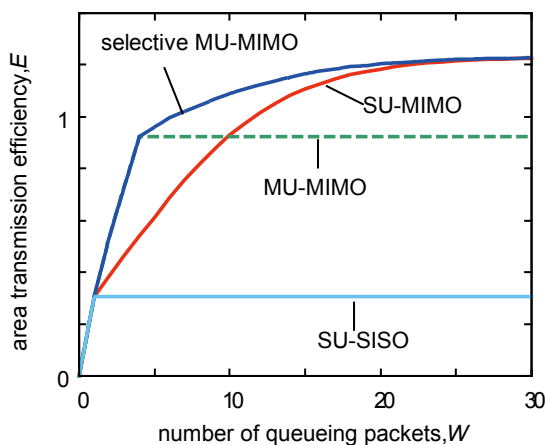


図2 面的伝送効率

さらに、送信 MU-MIMO に加え、受信 MU-MIMO を導入したときの面的伝送効率について評価した結果、送信 MU-MIMO のみの場合と比べ、送信/受信 MU-MIMO は2倍程度の効率が得られることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① 菅尾悠貴, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭, “無線メッシュネットワークにおける情報広告のためのランダムネットワーク・経路次元統合符号化,” 電子情報通信学会論文誌, 査読有, vol. J98-B, no. 4, pp. 373-382, 2015 年.
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j98-b_4_373
- ② 須崎修平, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭, “無線分散ネットワークにおけるリンク品質情報収集のための圧縮センシング・圧縮伝送手法,” 電子情報通信学会論文誌, 査読有, vol. J97-B, no. 10,

pp. 939-948, 2014 年.

http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j97-b_10_939

- ③ 楠本博則, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭, “マルチユーザ MIMO の無線メッシュネットワークへの適用とその性能解析,” 電子情報通信学会論文誌, 査読有, vol. J96-B, no. 7, pp. 670-679, 2013 年.
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j96-b_7_670
- ④ H. Okada, K. Mase, “Simple Analytical Method for Wireless Distributed Networks Considering Contending and Hidden Nodes,” IEICE Communications Express, 査読有, vol. 1, no. 3, pp. 101-106, 2012 年.
DOI:10.1587/comex.1.101

〔学会発表〕(計 18 件)

- ① H. Kusumoto, H. Okada, K. Kobayashi, M. Katayama, “Area Transmission Efficiency of Single-User and Multi-User MIMO in Grid-Topology Wireless Mesh Networks,” IEEE Vehicular Technology Conference, Glasgow, UK, 2015 年 5 月 12 日.
- ② 加藤達也, 須崎修平, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭, “屋内無線メッシュネットワークにおけるリンク品質のスペース特性評価,” 電子情報通信学会 総合大会, B-18-22, p. 569, 滋賀, 2015 年 3 月 10 日.
- ③ 峰松容浩, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭, “MIMO メッシュネットワークにおける自己組織化マップを用いた特徴解析,” 第13回複雑コミュニケーションサイエンス研究会, CCS-2014-04-12, pp. 41-45, 東京, 2015 年 3 月 6 日.
- ④ 須崎修平, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭, “無線分散ネットワークにおける圧縮センシングを用いたリンク品質情報共有手法と圧縮伝送手法の比較評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2014-248, pp. 165-169, 伊勢, 2014 年 12 月 19 日.
- ⑤ S. Suzaki, H. Okada, K. Kobayashi, M. Katayama, “An Information Sharing Method Using Compressed Sensing in Wireless Distributed Networks,” IEEE International Workshop on Management of Emerging Networks and Services, pp. 345-349, Austin, USA, 2014 年 12 月 8 日.
- ⑥ 須崎修平, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭, “無線分散ネットワークにおける圧縮センシングを用いたリンク品質情報共有手法 -誤差の累積を考慮した性能評価-,” 複雑コミュニケーションサイエンス研究会, CCS-007, 北海道, 2014 年 8 月 7 日.

- ⑦ H. Okada, A. Yoshimoto, K. Kobayashi, M. Katayama, K. Mase, "Switching Methods for Semi-Fixed Rate Control in IEEE 802.11n Wireless Mesh Networks," IEICE Information and Communication Technology Forum, Poznan, Poland, 2014年5月29日.
- ⑧ 峰松容浩, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭, "MIMO メッシュネットワークにおける自己組織化マップを用いた状態監視法の一検討," 電子情報通信学会技術研究報告, ASN2014-26, pp.87-90, 東京, 2014年5月29日.
- ⑨ 岡田啓, 須崎修平, 小林健太郎, 片山正昭, "[招待講演] 無線分散ネットワークにおける圧縮センシング・圧縮伝送によるリンク品質情報の共有," 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2014-9, pp.43-48, 名古屋, 2014年4月17日.
- ⑩ 岡田啓, "[招待講演] 無線メッシュネットワークのトラヒック理論的アプローチ," 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2013-64, pp.129-134, 名古屋, 2014年3月10日.
- ⑪ 楠本博則, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭, "面的伝送効率による Multi-User MIMO と Single-User MIMO を用いた無線メッシュネットワークの性能解析 -ノードを一様分布に配置した場合-, " 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2013-90, pp.73-78, 浜松, 2013年7月18日.
- ⑫ 岡田啓, 楠本博則, 小林健太郎, 片山正昭, "無線分散ネットワークのトラヒック理論的アプローチ -シングルユーザ/マルチユーザ MIMO を用いた無線ネットワークの性能解析-, " 電子情報通信学会技術研究報告, ASN2013-1, pp.1-6, 熊本, 2013年5月16日.
- ⑬ 吉本明人, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭, "半固定レート方式を適用した IEEE 802.11n 無線メッシュネットワークにおけるオートレートへの切替検出," 電子情報通信学会技術研究報告, AN2012-44, pp.133-138, 仙台, 2013年1月25日.
- ⑭ 楠本博則, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭, "無線メッシュネットワークにおける Multi-User MIMO と Single-User MIMO の面的伝送効率による比較評価," 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2012-206, pp.137-142, 松山, 2012年12月13日.
- ⑮ A. Yoshimoto, H. Okada, K. Kobayashi, M. Katayama, "Link Quality Evaluation Based on RSSI of Each Antenna for Transmission Rate Control in IEEE 802.11n Wireless Mesh Networks," Japan-Korea Joint Workshop on Complex Communication Sciences, Seoul, Korea, 2012年11月22日.
- ⑯ H. Okada, "Wireless Distributed Networks for Computers and Real World," Japanese-German Frontiers of Science Symposium, Potsdam, Germany, 2012年10月28日.
- ⑰ H. Kusumoto, H. Okada, K. Kobayashi, M. Katayama, "Performance Comparison between Single-User MIMO and Multi-User MIMO in Wireless Mesh Networks," International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, pp.199-203, Taipei, Taiwan, 2012年9月26日.
- ⑱ 吉本明人, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭, "IEEE 802.11n を用いた無線メッシュネットワークにおける送信レート制御のための RSSI によるリンク品質の評価," 電子情報通信学会技術研究報告, AN2012-9, pp.63-66, 豊橋, 2012年5月17日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 啓 (OKADA, Hiraku)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授

研究者番号：50324463