

機関番号： 12608

研究種目： 基盤研究 (A)

研究期間： 2007～2009 年度

課題番号： 19206043

研究課題名 (和文)

MIMO-OFDM メッシュネットワークの研究開発

研究課題名 (英文)

Research and Development of MIMO-OFDM Mesh Network

研究代表者

荒木純道 (KIYOMICHI ARAKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号： 60134821

研究成果の概要 (和文)：

本研究課題では、MIMO アンテナを搭載した中継ノードを介してマルチホップ中継通信を行う MIMO メッシュネットワークに関する研究開発を行った。送受信アルゴリズム、無線リソースの割当方式、中継ノード間同期方式、ネットワーク符号および協力中継方式に関する検討に基づき、MIMO メッシュ中継ノードの各通信レイヤのプロトコルを確立し、デモンストレータを構築した。伝送特性の総合評価では、提案方式が従来法の CSMA/CA に基づいたマルチホップ中継方式に比べて 6 倍程度高いスループットが得られ、また伝送遅延を大幅に削減できることを明確にした。ノード間隔が不規則なメッシュネットワークに対しても提案法の適応的な無線リソース制御を用いることで、充分適用可能であることを明確にした。開発したデモンストレータでは、双方向の画像通信を実際に行い、ノード間同期を含めた提案システムの実環境における有効性を示した。また 3 つのノードを用いた実験を屋内環境で行うことで、双方向中継の優位性を実環境で明らかとした。

研究成果の概要 (英文)：

This is an R&D research project of MIMO mesh network which consists of multiple relay nodes equipped with MIMO antenna to relay packets in a multi-hop manner. Based on investigation of MIMO transceiver design, resource allocation, node synchronization, network coding and cooperative relay, we established protocols for different layers of the mesh network and developed a demonstrator system. Through evaluation of transmission performance, we confirmed superiority of the proposed system to achieve a 6 times gain in achievable throughput and significant packet delay reduction in comparison with conventional multi-hop relay protocols based on CSMA/CA. We also proposed an adaptive wireless resource allocation scheme to maintain the effectiveness of the proposed system even in non-uniform network topology. In the demonstrator system, we realized two-way relay of graphic data, which is also a proof for the effectiveness of the proposed synchronization scheme. Furthermore, experiment results with a setup of 3 relay nodes in an indoor environment practically confirmed the superiority of two-way relay.

交付決定額

(金額単位：円)

|         | 直接経費         | 間接経費        | 合計           |
|---------|--------------|-------------|--------------|
| 2007 年度 | 14,200,000 円 | 4,260,000 円 | 18,460,000 円 |
| 2008 年度 | 9,400,000 円  | 2,820,000 円 | 12,220,000 円 |
| 2009 年度 | 5,000,000 円  | 1,500,000 円 | 6,500,000 円  |
| 年度      |              |             |              |
| 年度      |              |             |              |
| 総計      | 28,600,000 円 | 8,580,000 円 | 37,180,000 円 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，通信・ネットワーク工学

キーワード：メッシュネットワーク，MIMO，双方向中継，ネットワーク符号，与干渉・被干渉回避，伝送特性評価，デモンストレータ，実験

### 1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初，高速な無線マルチホップ中継ネットワーク (WMN) が，無線センサネットワークや無線スマートユーティリティネットワークなどを実現するキーテクノロジーとして注目を集めていた。WMN とは複数の無線ノード間に無線リンクを張る事で簡易にネットワークを構築する技術の総称である。しかしながら IEEE802.11s, IEEE802.16jWMAN, IEEE802.15.4 等の国際標準規格に準拠する従来の WMN はランダムアクセス方式である CSMA/CA プロトコルを採用しており，複数の無線リンクが存在する高トラヒック WMN では，隠れ端末問題やさらされ端末問題などの干渉問題や，送信機会が低下することによりネットワーク全体のスループットや遅延特性が劣化する問題があった。このランダムアクセス方式の代わりに TDMA や FDMA を導入すると，今度は時間および周波数分割損によってリソース利用効率が低下し，ネットワークスループットが劣化する問題があった。このように，高速な WMN の実現のためにはブレイクスルーが必要であった。

一方当時，通信伝送容量を向上する，送受信機双方で複数のアンテナを用いた空間多重技術である MIMO 通信技術が成熟しており，IEEE802.11n や IEEE802.16e 等の無線規格にも導入された。また，複数ユーザが同一チャネルで空間多重的に基地局にアクセスする，マルチユーザ MIMO 技術も理論的な検討が多数報告されていた。我々はこの MIMO 空間多重技術が高速 WMN を実現するためのブレイクスルーになると期待した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は，従来のランダムアクセス型 WMN がもつ問題点を根本的に解決し，高速な WMN を実現することである。具体的には，①ランダムアクセス型ではなく，TDD タイムスロットを導入した同期型マルチホップ中継ネットワークとすること，②MIMO 技術を応用したマルチホップ中継ネットワークにおける干渉回避技術を導入する事，③MIMO 干渉回避技術やネットワーク符号を導入することにより双方向のストリームを多重中継送信すること，の3点を基幹技術とする MIMO-OFDM メッシュネットワーク理論を確立し，プロトタイプハードウェアを開発して実験実証まで行う。

### 3. 研究の方法

**理論検討**：本研究における理論検討課題を下記に挙げる。

- ① MIMO メッシュネットワーク送受信アルゴリズム
- ② MIMO ネットワーク符号アルゴリズム
- ③ 無線リソース割当方式
- ④ マルチストリームルーティングアルゴリズム
- ⑤ MIMO メッシュネットワークシミュレータの構築・全体評価

高速 WMN を実現するために，本研究では非効率なランダムアクセスではなく，TDD による同期型のマルチホップ中継ネットワークとすることにより，チャネルアクセス時間の無駄を省き，無線リソース利用効率を向上する。また，物理層において MIMO 技術を導入し，送受信ビームフォーミングの最適化や，ネットワーク符号を組み合わせて用いる事により，干渉回避および双方向ストリーム多重を行う。さらに各ノードで分散的に電力制御を行う事により，ノード配置の不規則性によって生じる遠方干渉問題やボトルネックリンクの通信容量低下問題を解消する。また，無線伝搬環境に応じて最適なノード配置もしくはルーティングを決定する手法を提案する。最終的に全体シミュレータにより提案手法の特性評価を行う。本理論検討では1次元トポロジのメッシュネットワーク (マルチホップ中継ネットワーク) のみの検討となっているが，今後2次元化するためには更にマルチストリーム MAC スケジューラの検討が必要である。

**ハードウェア実装及び実験検討**：理論検討課題で確立した MIMO-OFDM メッシュネットワークを実機実証によりその実現性を示す。検討課題を以下に挙げる。

- ① 950MHz 帯プロトタイプハードウェアの開発
- ② ネットワーク同期手法の確立
- ③ デモンストレータの開発
- ④ 屋内環境における中継実験

無線センサネットワークを実現させる周波数帯として注目を集めていた 950MHz 帯においてプロトタイプハードウェアを開発した。また双方向中継に対応したネットワーク同期手法を提案し，プロトタイプハードウェアに実装し，1次元デモンストレータを開発

する。開発したデモンストレータシステムを用いて、屋内環境における双方向中継伝送実験を行い、本研究課題の実現性を示す。

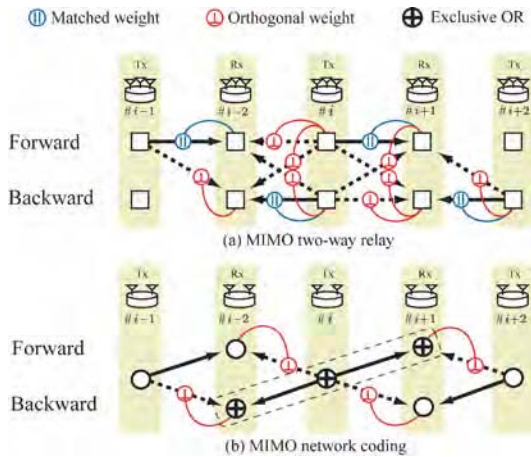


図1-提案双方向中継ネットワーク。

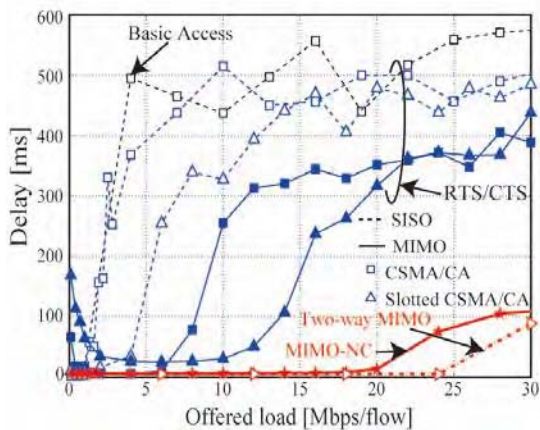
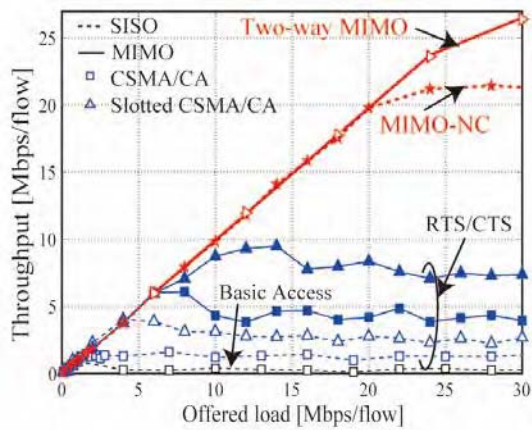


図2-ネットワーク特性の比較。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 CSMA/CA との特性比較

本研究で提案した MIMO メッシュネットワークの特性評価を全体シミュレータによっ

て行い、従来法である IEEE802.11s に準ずる CSMA/CA に基づくマルチホップネットワークとの比較を行った。結果を図2に示す。従来法ではトラヒックが増加した際にネットワークスループットが飽和してしまうのに対し、提案法は従来法に比べて約6倍のネットワークスループットを実現することを示した。また伝送遅延を大幅に削減できることも明確にした。提案法を用いることで高速・高信頼の WMN が実現できることを示している。

##### 4.2 適応的な無線リソース制御（電力制御とルーティング）

MIMO メッシュネットワークでは遠方ノードからの同一チャネル干渉の影響で、各リンクの通信容量が劣化、ばらつきが生じる問題がある。また、トポロジ（ノード配置）の偏りによっても、同様の問題が生じる。これはボトルネックリンクを発生させ、ネットワーク全体のスループットが低下する。そこで各ノードの送信電力を制御する事により干渉量を制御するアルゴリズムを提案した。電力制御方法として集中制御である EPA (Eigen-value based Power Allocation) と OPA (Optimal Power Allocation)、分散制御法として DPA (Distributed Power Allocation) をそれぞれ提案した。各手法の比較を表1に、電力制御特性を図3に示す。電力制御を導入する事によってボトルネックリンクの通信容量が改善され、ネットワークスループットが向上している事がわかる。またこれによりトポロジに対しても柔軟性を確保する事ができる。

図3-電力制御の特性。

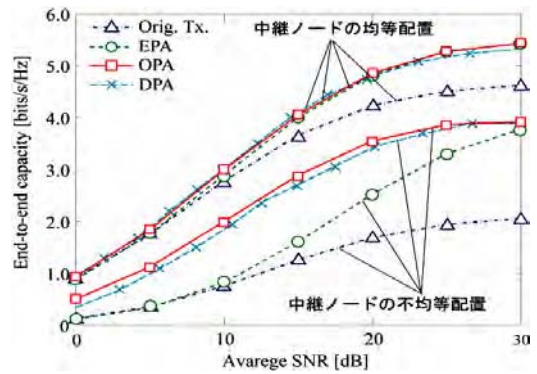
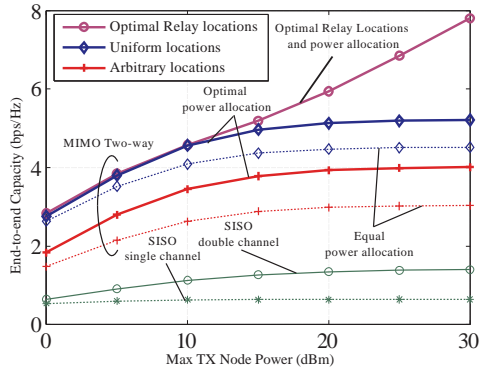


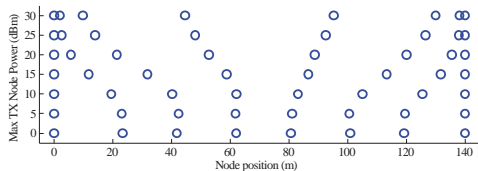
表1-電力制御法の比較。

|     | 制御信号の交換 | 計算量 | 処理時間 | 性能 |
|-----|---------|-----|------|----|
| EPA | ×       | △   | ○    | △  |
| OPA | ×       | ×   | ○    | ◎  |
| DPA | ○       | ○   | ×    | ○  |

同様に最適なノード配置すなわちルーティングも電力制御と同様の問題として考える事ができる。電力制御を考慮した最適ノード配置問題を凸最適化問題として解く事により解決する。図4に最適ノード配置を行ったときのネットワークスループットとその際のノード配置を示す。特に各ノードにおける送信電力が大きいきにその効果が大きい事がわかる。



(a) End-to-end capacity of MIMO two-way multihop network



(b) Optimal relay locations for different node power constraints  $P_{max}$

図4—電力・ルーティングの同時最適化。

#### 4. 3 ネットワーク同期

MIMO-OFDM メッシュネットワークの基幹技術である TDD 双方向 MIMO-OFDM マルチホップ中継ネットワークは、ブロードキャストと MIMO マルチプルアクセスが交互に存在するような TDD マルチホップ中継ネットワークである。さらに OFDM を組み合わせて用いているため、MIMO マルチプルアクセスをする両隣の送信ノードからの信号が受信ノードにガードインターバルの猶予内で同時に到来する必要がある。これを満足できない場合、フレーム同期誤りが発生し、キャリア間干渉 (ICI) やシンボル間干渉 (ISI) を引き起こす。従って、本ネットワーク実現のためには適切なネットワーク同期手法が必要となる。

本研究では送信および受信双方のタイミングに基づく、OFDMA におけるレンジング手法をネットワーク的に拡張した手法を提案した。本手法は受信ノードにおいて到来時間差を生じさせないように各ノードにおける送信タイミングを調整する手法で、1フレームにつき1つの調整時間を用意するだけでネットワーク同期を完遂できるため、時間利用効率が高く、理論限界に近いネットワークキャパシティを実現する事ができる。

#### 4. 4 デモンストレータの開発

950MHz 帯 MIMO メッシュ中継ノードのプロトタイプハードウェアを開発し、本ハードウェアを複数台用いた双方向中継ネットワークのデモンストレータを完成させた。今回のデモンストレーションでは双方向ストリーム多重にネットワーク符号方式を用いている。図5は3台の場合のデモンストレーションであり、第1ノードは前向きストリームの起点ノードであり、後向きストリームの終点ノードである。また第2ノードは双方向ストリームの中継ノードであり、第3ノードは前向きストリームの終点ノード、後向きストリームの起点ノードである。

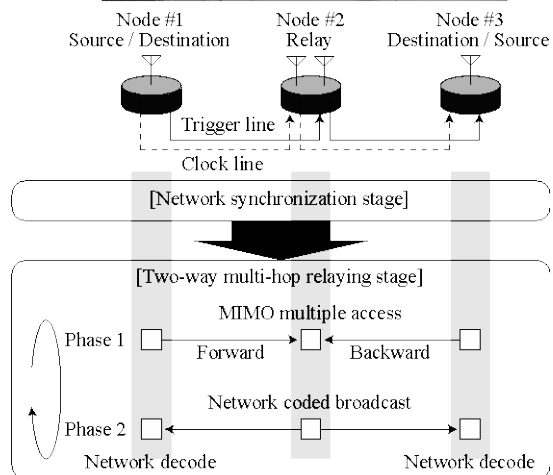


図5—デモンストレータ。

図5にデモンストレーションの動作概要を示す。まず4.3節で述べた手法を基にしたネットワーク同期を行い、その後双方向中継モードへ移行する。まず第1フェーズにおいて第1ノードおよび第3ノードが前向きおよび後向きストリーム信号をそれぞれ第2ノードに送信する。第2ノードはこれらの信号を MIMO マルチプルアクセスにより受信し、これらの復調信号をネットワーク符号かし、第2フェーズにおいて第1ノード、第3ノードに対してブロードキャストする。第1ノード、第3ノードではそれぞれ第1フェーズに自身が送信した信号を用いて、第2フェーズで受信したネットワーク符号化信号をネットワーク復号し、所望信号のみを得る。これにより半分のフェーズで双方向中継を完遂する。

#### 4. 5 屋内環境における中継実験

4.4 節で完成させたデモンストレーションシ

システムを用いて、屋内環境下において双方向マルチホップ中継伝送実験を行った。図6に実験環境を示す。

第1ノードを部屋1に、第3ノードを部屋2に、第2ノードは廊下に設置した。いずれも測定中は部屋のドアを閉めた状態で、また各ノードは別のフロアからリモートコントロールを行う事により、準静的な環境を実現している。また中継ノードにおいてはマルチパスフェージングの影響を平均化するために2次元ポジショナを用いて面的に測定を行った。

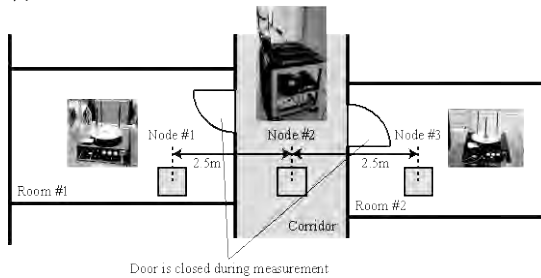


図6-測定環境。

図7に測定結果を示す。横軸は第1ノードと第3ノード間のSNRであり、縦軸はEnd-to-end スループットである。図中のDirect linkは第1ノードと第3ノードとを直接通信した結果であり、直接SNRが低いときにはそのスループットも劣化していることがわかる。また図中のTDD one-wayは単純な片方向のマルチホップ中継を左向きと右向きの2回、合計4フェーズを用いて双方向伝送を行った場合の結果で、直接SNRが低い場合に中継効果によりスループットを改善できているが、双方向伝送にかかるフェーズ数が2倍になっているため、直接SNRが高い場合にはそのスループットは半分になっている。一方ネットワーク符号を用いた双方向マルチホップ中継ネットワークでは中継効果および双方向ストリーム多重効果により単純片方向マルチホップの結果に対して約2倍のスループットを実現していることがわかる。これらの効果を実機実証した例は世界初である。

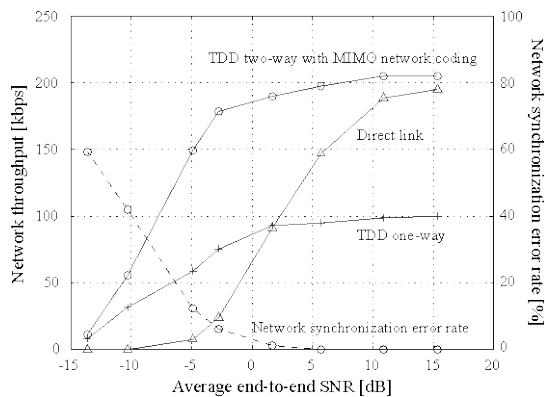


図7-測定結果。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

1. S. Sampei, K. Sakaguchi, S. Ibi, K. Yamamoto, "Wireless distributed network for flexible networking and radio resource management," IEICE Trans. Commun. E93-B, no.12, pp. 3218-3227, Dec. 2010.
2. J. Lee, G. K. Tran, K. Sakaguchi, K. Araki, "Effect of power allocation schemes on MIMO two-way multi-hop network," IEICE Trans. Commun. E93-B, no. 12, pp. 3362-3370, 2010.
3. G. K. Tran, K. Sakaguchi, K. Araki, "MIMO network coding-based PHY/MAC protocol for replacement of CSMA/CA in efficient two-way multi-hop relay networks," EURASIP J. Wireless Commun. Networking, ID476732, 2010.
4. G. K. Tran, K. Sakaguchi, F. Ono, K. Araki, "2D MIMO Network Coding with Inter-Route Interference Cancellation," IEICE Trans. Commun., vol. E92-B, no. 12, pp. 3665-3675, Dec. 2009.
5. F. Ono, K. Sakaguchi, "STBC MIMO Network Coding for Bi-directional Multi-Hop Relay Networks," IEICE Trans. Commun., vol. E92-B, no. 12, pp. 3676-3682, Dec. 2009.
6. F. Ono, K. Sakaguchi, "MIMO Spatial Spectrum Sharing for High Efficiency Spectrum Mesh Network," IEICE Trans. Commun., vol. E91-B, no. 1, pp. 62-69, Jan. 2008.

[学会発表] (計9件)

1. R. Ramamonjison, J. Lee, K. Sakaguchi, K. Araki, "Routing and power allocation in MIMO two-way multi-hop networks: a new cross-layer approach to mitigate interference," IEEE Globecom, Miami, Dec. 6-10 2010.
2. K. Mizutani, T. Miyamoto, K. Sakaguchi, K. Araki, "Network throughput of TDD/TDMA two-way multi-hop relay network with MIMO network coding in indoor environment," IEEE PIMRC WDN workshop, Istanbul, Sept. 26-30 2010.
3. R. Ramamonjison, J. Lee, K. Sakaguchi, K. Araki, "On the spectral efficiency of MIMO two-way multi-hop networks with co-existing flows," ICST CrownCom, Cannes, June 9-11 2010.

4. K. Mizutani, K. Sakaguchi, K. Araki,  
“Network synchronization for two-way  
multi-hop relay networks with block  
modulation,” IEEE VTC-Spring, Taipei,  
May 16-19 2010.
5. K. Mizutani, T. Miyamoto, T. Kanno,  
K. Sakaguchi, K. Araki, “Hardware  
prototype for two-way multi-hop relay  
network with MIMO network  
coding,” IEEE VTC-Spring, Taipei, May  
16-19 2010.
6. G. K. Tran, K. Sakaguchi, K. Araki, “An  
efficient retransmission scheme for  
MIMO two-way relay network,” IEEE  
VTC-Spring, Taipei, May16-19  
2010.
7. G. K. Tran, K. Sakaguchi, K. Araki,  
“Wireless Mesh Network Performance:  
MIMO Two-way Relay vs. CSMA/CA based  
Protocols,” IEEE PIMRC, Tokyo,  
Sep, 13-16 2009.
8. G. K. Tran, K. Sakaguchi, K. Araki,  
“Network Simulator Implementation of  
1D MIMO Network Coding and Performance  
Comparison with CSMA/CA,” IEEE ICICS,  
Macau, Dec. 8-10 2009.
9. J. Lee, G. K. Tran, K. Sakaguchi, K. Araki,  
“Power Allocation for MIMO Two-way  
Relay Networks,” IEEE ICICS, Macau,  
Dec. 8-10 2009.

[図書] (計 1 件)

三瓶政一, 阪口啓, “無線分散ネットワーク,”  
215 ページ 電子情報通信学会, 2011 年 3 月

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

荒木 純道 (ARAKI KIYOMICHI)

研究者番号 : 60134821

### (2) 研究分担者

阪口 啓 (SAKAGUCHI KEI)

研究者番号 : 80323799