

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420357

研究課題名(和文) アンライセンスバンドの高度活用を目指した協調型プライベート無線ネットワーク

研究課題名(英文) Cooperative Private Wireless Networks for Efficient Utilization of Unlicensed Radio Spectrum

研究代表者

宮本 伸一 (Miyamoto, Shinichi)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：50252614

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：無線局免許を必要としない周波数帯(アンライセンスバンド)では、周波数資源の管理主体が存在しない状況下で、無線LANや無線PANなど様々な標準規格に準拠したプライベート無線ネットワークが自律的に周波数資源を共有する。このため、プライベート無線ネットワークの伝送性能を向上するためには、アンライセンスバンドの周波数資源の有効活用が必須である。本研究課題では、アンライセンスバンドの周波数資源の有効活用を目的として、周波数資源を共有する端末群が協調してグループを形成し、個々の端末のQoS要求に応じて各端末に周波数資源を適切に配分する協調型プライベート無線ネットワークを構築し、その有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To improve the transmission performance of private wireless networks operated in unlicensed radio frequency bands, this research proposes a distributed medium access control protocol that enables centralized radio resource management. In the protocol, private wireless networks existing in the same area form a cooperative group, and the central controller acts as a master to organize the access of associated stations. Once the cooperative group reserves the radio resource, the central controller allocates the reserved radio resources to the stations. Since the central controller dynamically allocates the fine-grained resource blocks to the stations through the opportunistic two-dimensional scheduling based on the channel and traffic conditions of each station, the transmission opportunities can be granted to the appropriate stations. Numerical results confirm that the proposed protocol enhance the throughput while satisfying QoS requirements.

研究分野：無線通信方式

キーワード：アンライセンスバンド 無線ネットワーク 周波数資源の有効利用 周波数共有 集中管理 ヘテロジニアスネットワーク 媒体アクセス制御

1. 研究開始当初の背景

無線 LAN, Bluetooth, ZigBee などのプライベート無線ネットワークは、その急速な普及に伴う利用可能な周波数資源の枯渇が懸念される一方、用途の多様化に伴い、伝送特性のさらなる向上が求められている。

限られた周波数資源の下、伝送特性の向上を図る手法として、事業者専用の周波数帯域が割り当てられるセルラネットワークでは、各端末の QoS (Quality of Service) 要求やトラヒック状況を把握した上で、各端末へ適切に周波数資源を付与する手法が用いられている。それに対し、プライベート無線ネットワークが運用されるアンライセンスバンドは無線局免許が不要な周波数帯であり、そこでは管理主体や規格の異なる端末群が周波数資源を共用する。そのため、媒体アクセス制御方式として、互いに独立した無線ネットワークであっても周波数資源を共用可能な CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) が用いられている。CSMA/CA 方式は、IEEE 802.11 規格において DCF (Distributed Coordination Function) 方式として規定され、キャリアセンス時間をランダムに決定することで送信機会の平等性を保証する。しかし、DCF 方式では、各端末は自身のチャンネル状況とは無関係に送信権の獲得を試みるため、無線リソースを有効に活用できる端末が送信権を獲得できるとは限らない。

2. 研究の目的

規格の異なるプライベート無線ネットワークがアンライセンスバンドの周波数資源を共用することに起因する問題は共存問題として古くから認識されており、数多くの共存問題に関する検討がなされてきた。本研究代表者も、これまで、無線 LAN と Bluetooth の共存問題、および、2.4 GHz 帯のアンライセンスバンドのプライマリユーザである高周波利用設備から発生する人工雑音が無線 LAN の伝送特性に及ぼす影響に関する検討を行ってきた。また、伝送特性を改善する手法として、OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) を導入し、BSS (Basic Service Set) 内のアクセスポイント (AP) と端末 (STA) に対して柔軟に周波数資源を付与する方式を検討した。それら検討を通じて、以下の知見を得た。

- ① 同一規格に準拠する端末間では、無線信号による情報の送受信が可能である。端末間で周波数共用に関する情報を授受することで、キャリアセンスよりも高度な周波数共用を実現可能である。
- ② 規格の異なる端末間であっても、それら複数の規格の通信機能を装備し、無線信号を翻訳できる仲介端末 (コーディネータ) を介在させることにより、無線信号による情報の送受が可能となる。仲介端末を介して、異種規格の端末間で周波数共用に関する情報を授受することで、より高度な周波数共用を実現可能である。

以上の考えに基づき、本研究では、アンライセンスバンドの周波数資源の有効活用を図る手法として、アンライセンスバンドを共用する同種/異種規格の端末群が協調し、個々の端末の QoS 要求に応じて周波数資源を付与する協調型プライベート無線ネットワークを提案し、その有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

準拠する規格の種類および無線ネットワークの範囲に応じて、協調型プライベート無線ネットワークは以下のように大別される。

- ① 同一規格・単一ネットワーク内協調 (図 1)
- ② 同一規格・複数ネットワーク間協調 (図 2)
- ③ 異種規格・複数ネットワーク間協調 (図 3)

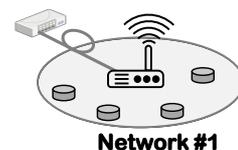


図 1 同一規格・単一ネットワーク内協調

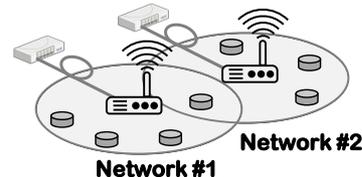


図 2 同一規格・複数ネットワーク間協調



図 3 異種規格・複数ネットワーク間協調

- ① 同一規格・単一ネットワーク内協調
 - (1-1) グループ形成プロトコルの構築：伝送空間内に遍在する端末群がグループを形成するために必要な情報を選定し、それら情報を集約するプロトコルとグループ形成アルゴリズムを考案した。
 - (1-2) 周波数資源獲得プロトコルの構築：グループ形成後、端末群はグループとして利用可能な周波数資源を獲得する必要がある。ここでは、グループとして周波数資源を獲得するためのプロトコルを考案した。
 - (1-3) 周波数資源割り当てに必要な情報集約プロトコルの構築：グループとして周波数資源を獲得した後、個々の端末の QoS 要求に応じて、各端末に適切に周波数資源を配分する必要がある。ここでは、周波数資源の配分に必要となる情報 (例えば各端末の QoS 要求、チャンネル状況、トラヒック状況) を集約するプロトコルを考案した。

(1-4) 周波数資源割り当てアルゴリズムの開発：周波数資源の割り当てに必要な情報を基に、各端末に周波数資源を配分するアルゴリズムを考案した。

② 同一規格・複数ネットワーク間協調

図 2 に示す同一規格・複数ネットワーク間で互いに周波数資源を共用する場合も、同様に(1-1)～(1-4)を考案する必要がある。ここでは、まず、上記①で得られた知見を基に、各々のプロトコルを考案した。

さらに、複数のプライベート無線ネットワーク間の協調を対象とするため、

- グループの管理主体(AP)の決定方法
- グループの管理主体(AP)のカバレッジ外に存在する端末の管理方法

を確立する必要がある。そこで、これら課題を解決するために、以下の事項を実施した。

(2-1) グループの管理主体決定方法の確立：

図 2 に示すように、管理主体と成り得る AP が複数存在する場合、それらの候補の中から、管理主体となる AP を決定する必要がある。ここでは、各々の AP のカバレッジ、帰属する端末数、受信信号強度を基に、グループの管理主体となる AP の決定方法を確立した。

(2-2) 管理主体(AP)のカバレッジ外に存在する

端末の管理方法の確立：図 2 に示すように、管理主体のカバレッジ外に端末が存在する場合、それらの端末の QoS 要求を管理主体に集約する方法、および、管理主体からそれらの端末に周波数資源配分結果を通知する方法を考える必要がある。複数 AP からの協調伝送技術を導入し、カバレッジ外に位置する端末の管理手法を確立した。

③ 異種規格・複数ネットワーク間協調

本研究課題では、マイクロ波帯を利用する無線 LAN システム(IEEE 802.11a/g 標準規格)とミリ波帯を利用する無線 LAN システム(IEEE 802.11ad)が共存する環境を想定した。

ミリ波無線 LAN システムの課題として遮蔽に対して脆弱である点が挙げられる。その対策として、複数のミリ波 AP を設置し、それら複数の AP を管理する無線周波数資源コーディネータを導入する。コーディネータの集中管理の下、複数の AP と端末群が互いに協調可能なグループを形成することにより、遮蔽に対する耐性を高めつつ、無線周波数資源の高密度利用が期待される。しかしながら、一方、伝送空間内に設置された全ての AP が互いに協調して動作するためには、それら複数の AP は相互に接続される必要がある。全ての AP に対して有線系ネットワークで接続すると、結果としてネットワークを構築するためのコストが高くなってしまふ。この問題を解決するために、リレーデバイスを用いるシステムも併せて導入した。リレーデバイスは AP と端末との間に遮蔽物が発生した際、AP と端末との

間の通信を中継する機能を持つ。AP の周囲に複数のリレーデバイスを設置することで、端末は AP とリレーデバイスの双方に対してリンクを確立することが可能となり、カバレッジを重複させて複数の AP を設置した際と同等の遮蔽物への耐性を獲得できる。

以上の考えに基づき、本研究課題では、各 AP もしくはリレーデバイスと端末との間の伝送にはミリ波帯無線 LAN システムを用い、コーディネータと複数の AP およびリレーデバイスとの間の伝送にはマイクロ波帯無線 LAN システムを用いる異種規格・複数ネットワーク間協調システムを提案した。

4. 研究成果

① 同一規格・単一ネットワーク内協調

同一規格・単一ネットワーク内協調の有効性を検証するため、計算機シミュレーションにより伝送性能を評価した。

同一規格・単一ネットワーク内協調を用いた場合のスループット特性を図 4 に示す。また、IEEE 802.11 標準規格で規定される DCF 方式および、QoS 保証のための媒体アクセス制御方式である EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) 方式を用いた場合のスループット特性も評価し比較対象とする。図 4 より、本研究課題で提案した同一規格・単一ネットワーク内協調のための媒体アクセス制御プロトコルを用いることによりスループットが向上することがわかる。

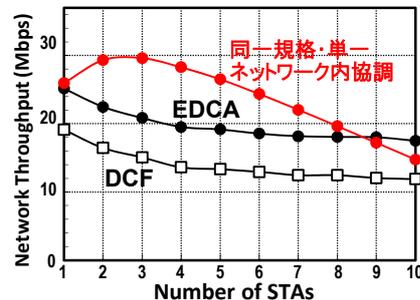


図 4 同一規格・単一ネットワーク内協調のスループット特性

② 同一規格・複数ネットワーク間協調

同一規格・単一无線ネットワーク内協調を行う場合と同一規格・複数ネットワーク間協調を行う場合のシステム構成と媒体アクセス制御プロトコルを図 5 に示す。同図では、BSS #1-BSS #3 の 3 つの BSS が共存する環境を想定している。① 同一規格・単一ネットワーク内協調の場合は、1 つの BSS 内でのみ獲得した無線周波数資源を共用するのに対し、② 同一規格・複数無線ネットワークでは、同一伝送空間内に共存する 3 つの BSS で無線周波数資源を共用する。

同一規格・複数ネットワーク間協調では、複数の AP のうち、集中管理局として機能する AP を Master AP (M-AP)、その他の AP を Slave AP (S-AP) と呼ぶ。グループ内の端末がデータフレームを伝送する際は、まず、個々の端末

は DCF 方式に基づいて送信権を獲得した後、RTS (Request-to-Send) フレームを送信し、周波数を共有する他の端末に対し排他的に無線リソースを利用するために無線媒体を予約する。次いで、M-AP はグループに属する全端末ならびに全 S-AP と制御フレームを交換し、各端末の保持するパケットの遅延状況および各 AP と端末の間の伝搬路状況に関する情報を集約する。その後、M-AP は集約された情報を基に各端末の無線リソース割り当てを行う。

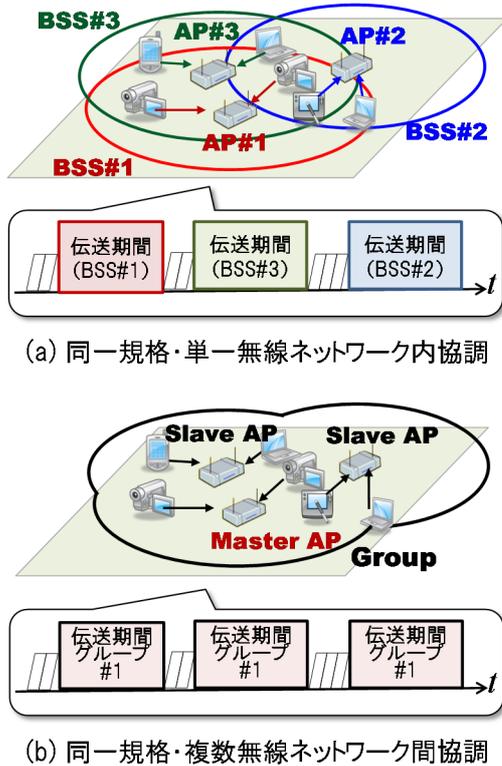


図5 ①同一規格・単一无線ネットワーク内協調と②同一規格・複数無線ネットワーク間協調の比較 (BSS 数3の場合)

同一規格・複数ネットワーク間協調の伝送性能を評価した。AP と端末の配置例を図6に示す。また、AP 分布距離 d (m) に対するエリアスループットの関係を図7に示す。同図より、本研究課題で提案した同一規格・複数ネットワーク間協調を導入することで、スループットが向上することがわかる。

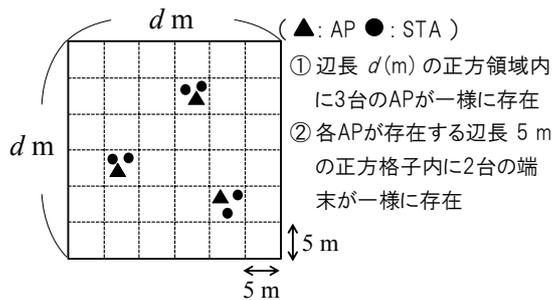


図6 AP および端末の配置

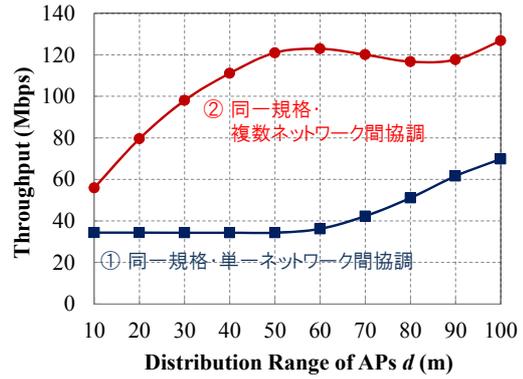


図7 ①同一規格・単一ネットワーク内協調と②同一規格・複数ネットワーク間協調のスループットの比較

③ 異種規格・複数ネットワーク間協調

ここでは、異種規格・複数ネットワーク間協調として、マイクロ波帯無線 LAN システム (IEEE 802.11a/g) とミリ波帯無線 LAN システム (IEEE 802.11ad) が共存する環境を想定した (図8)。本研究で提案した媒体アクセス制御プロトコルを図9に示す。時間区間(A)では、AP は、リレーデバイス、中継伝送端末 (STA #1)、直接伝送端末 (STA #2) との間でマイクロ波帯を用いて RTS/CTS フレームを交換する。次いで、時間区間(B)では、ミリ波帯を用いてリレーデバイス宛に伝送する。時間区間(C)では、リレーデバイスから STA #1 へミリ波帯を用いた伝送を行うと同時に、空間多重により、AP から STA #2 へも伝送する。これにより、遮蔽に対する耐性を維持しつつ、リレーデバイスを用いた中継伝送に起因する伝送性能の低下の抑制が期待される。

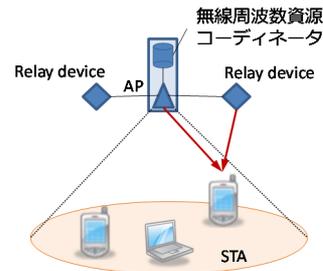


図8 ③異種規格・複数無線ネットワーク間協調の例 (マイクロ波帯無線 LAN とミリ波帯無線 LAN 間の協調)

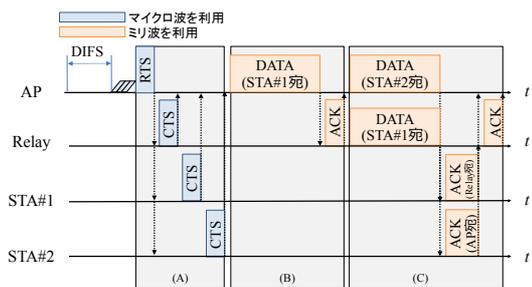


図9 ③異種規格・複数無線ネットワーク間協調の媒体アクセス制御プロトコル

異種規格・複数ネットワーク間協調の有効性を検証するため、伝送性能を計算機シミュレーションにより評価した。APと端末およびミリ波帯リンクを遮蔽する物体(遮蔽物)の配置を図10に示す。遮蔽物は、高さ1.7 m、半径0.5 mの円柱でモデル化され、速さ1 m/sで往復運動するものとした。

図10に示す環境において、リレーデバイスを用いたミリ波無線LANシステムと、提案システムの双方において、空間内の全端末が1 GByteのデータをダウンロードするのに要する時間を評価した結果を図11に示す。まず、リレーデバイスを用いたミリ波無線LANシステムでは、伝送特性の傾きが急峻な箇所と緩やかな箇所が繰り返されている。これは、伝送特性の傾きが緩やかな場所において、APと端末の間に遮蔽物が存在していることを示す。リレーデバイスを用いたミリ波無線LANシステムでは、APと端末の間に遮蔽物が存在すると、リレーデバイスを經由して端末にフレームを送信しなければならない、その間ダウンロード速度が低下する。一方、提案システムでは、リレーデバイスが端末へデータフレームを送信している間、他の端末へデータフレームを送信しているため、ダウンロード速度の低下が抑えられている。これらの結果から、提案システムは遮蔽物が存在する環境において、高速なダウンロードが可能であり、その有効性を確認できる。

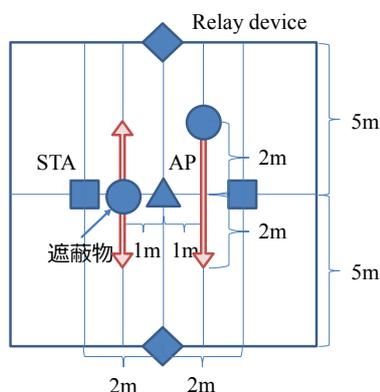


図10 APおよび端末、遮蔽物の配置

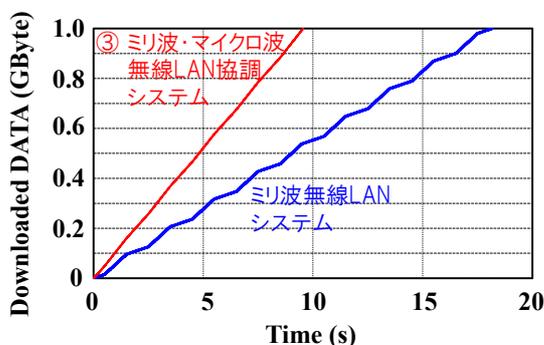


図11 ③異種規格・複数ネットワーク間協調(ミリ波・マイクロ波無線LAN協調システム)のダウンロードデータサイズ

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Kei Sakaguchi, Ehab Mahmoud Mohamed, Hideyuki Kusano, Makoto Mizukami, Shinichi Miyamoto, Roya Rezagah, Koji Takinami, Kazuaki Takahashi, Naganori Shirakata, Hailan Peng, Toshiaki Yamamoto, Shinobu Namba, "Millimeter-wave Wireless LAN and its Extension toward 5G Heterogeneous Networks," IEICE Trans. on Commun., (Invited Paper), vol. E98-B, no. 10, pp. 1932-1948, 2015, DOI: 10.1587/transcom.E98.B.1932(査読有).
- ② Shinichi Miyamoto, Naoya Ikeshita, Seiichi Sampei, Wenjie Jiang, "Multi-Stage DCF-based Channel Access Scheme for Throughput Enhancement of OFDMA WLAN Systems," IEICE Trans. on Commun., vol. E97-B, no. 10, pp. 2230-2242, 2014, DOI: 10.1587/transcom.E97.B.2230(査読有).

[学会発表] (計19件)

- ① 池田圭佑, 川原匡史, 宮本伸一, 三瓶政一, "ミリ波無線LANシステムにおける中継局を用いた端末の集中によるスループット低下の抑制に関する研究," 2017年電子情報通信学会総合大会, 2017年3月22日-2017年3月25日, 名城大学(愛知県・名古屋市).
- ② 淵辺悠太, 宮本伸一, "無線LAN保護のための仮想専用チャネル構築法における漏洩同軸ケーブルを用いた媒体予約方式," 2017年電子情報通信学会総合大会, 2017年3月22日-2017年3月25日, 名城大学(愛知県・名古屋市).
- ③ 中沢雄介, 宮本伸一, "無線LAN保護のための仮想専用チャネル構築法における媒体予約の高効率化に関する一検討," 2017年電子情報通信学会総合大会, 2017年3月22日-2017年3月25日, 名城大学(愛知県・名古屋市).
- ④ 川原匡史, 宮本伸一, 三瓶政一, "リレーデバイスを用いたミリ波無線LANシステムにおける集中制御型媒体アクセス制御方式," 電子情報通信学会無線通信システム研究会(移動通信ワークショップ), 2017年3月1日-2017年3月3日, 東京工業大学(東京都・目黒区).
- ⑤ 中沢雄介, 宮本伸一, "無線LAN保護のための仮想専用チャネル構築法における高効率媒体予約方式," 平成28年電気関係学会関西連合大会, 2016年11月22日-

2016年11月23日, 大阪府立大学(大阪府・堺市).

- ⑥ 中沢雄介, 宮本伸一, “プライベート空間において運用される無線 LAN 保護のための媒体予約方式に関する一検討,” 電子情報通信学会スマート無線研究会 2016年10月27日-2016年10月28日, 大阪大学中之島センター(大阪府・大阪市).
- ⑦ 宮本伸一, “IoT の実現に向けた無線ネットワークにおける電磁環境の評価と対策,” 2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2016年9月20日-2016年9月23日, 北海道大学(北海道・札幌市).
- ⑧ 棟田淳哉, 宮本伸一, 三瓶政一, “分散配置された複数 AP からなるミリ波無線 LAN システムにおけるユーザの移動予測に基づく接続 AP 割り当て手法に関する一検討,” 2016年電子情報通信学会総合大会, 2016年3月15日-2016年3月18日, 九州大学(福岡県・福岡市).
- ⑨ 川原匡史, 宮本伸一, 三瓶政一, “マイクロ波帯を介して AP 連携を行うミリ波無線 LAN システムにおけるデュアルバンド媒体アクセス制御プロトコルの高効率化に関する一検討,” 2016年電子情報通信学会総合大会, 2016年3月15日-2016年3月18日, 九州大学(福岡県・福岡市).
- ⑩ 山部和章, 宮本伸一, 三瓶政一, “無線 LAN の媒体予約機能を用いた Bluetooth LE 通信における干渉排除に関する一検討,” 2016年電子情報通信学会総合大会, 2016年3月15日-2016年3月18日, 九州大学(福岡県・福岡市).
- ⑪ 宮本伸一, 大前篤史, 三瓶政一, “プライベート空間において運用される無線 LAN の仮想専用チャネル構築手法における NAV フレーム送信電力に関する一検討,” 2016年電子情報通信学会総合大会, 2016年3月15日-2016年3月18日, 九州大学(福岡県・福岡市).
- ⑫ 棟田淳哉, 宮本伸一, 三瓶政一, “リレーデバイスを用いたミリ波無線 LAN システムにおける集中制御型媒体アクセス制御方式,” 電子情報通信学会無線通信システム研究会(移動通信ワークショップ), 2016年3月2日-2016年3月4日, 東京工業大学(東京都・目黒区).
- ⑬ 川原匡史, 宮本伸一, 三瓶政一, “ミリ波無線 LAN システムにおけるマイクロ波帯を介した AP 連携のためのデュアルバンド媒体アクセス制御プロトコル,” 2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会,

2015年9月8日-2015年9月11日, 東北大学(宮城県・仙台市).

- ⑭ 大前篤史, 宮本伸一, 三瓶政一, “無線 LAN システムにおける仮想専用チャネル構築のための分散配置された端末からの巡回 NAV 通知に関する一検討,” 2015年電子情報通信学会総合大会, 2015年3月10日-2015年3月13日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス(滋賀県・草津市).
- ⑮ 延堂拓也, 宮本伸一, 三瓶政一, 姜聞杰, “集中制御型無線 LAN システムにおける BSS 間協調リソースマネジメントの提案,” 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2014年12月18日-2014年12月19日, 伊勢市観光文化会館(三重県・伊勢市).
- ⑯ 棟田敦哉, 宮本伸一, 三瓶政一, “姜聞杰集中制御型無線 LAN システムにおける高効率媒体予約手法の提案,” 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2014年12月18日-2014年12月19日, 伊勢市観光文化会館(三重県・伊勢市).
- ⑰ 延堂拓也, 宮本伸一, 三瓶政一, “姜聞杰, DCF 方式を用いた OFDMA 無線 LAN システムにおける OBSS 環境での BSS 間協調リソースマネジメントに関する一検討,” 2014年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014年9月23日-2014年9月26日, 徳島大学(徳島県・徳島市).
- ⑱ 棟田敦哉, 宮本伸一, 三瓶政一, 姜聞杰, “DCF 方式を用いた OFDMA 無線 LAN システムにおける高効率媒体予約手法に関する一検討,” 2014年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014年9月23日-2014年9月26日, 徳島大学(徳島県・徳島市).
- ⑲ Shinichi Miyamoto, Seiichi Sampei, “Group-based Centralized Radio Resource Management Strategies in Wireless Local Area Networks,” 2014 General Assembly of International Union of Radio Science (URSI-GA 2014), *Invited Paper*, 2014年8月16日-2014年8月23日, 北京(中国).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮本 伸一 (MIYAMOTO, Shinichi)
和歌山大学・システム工学部・教授
研究者番号: 50252614