

次世代無線 NW のためのグローバル連携制御

研究代表者	塚本 和也	九州工業大学大学院	情報工学研究院	准教授
研究分担者	野林 大起	九州工業大学大学院	工学研究院	助教

1 研究調査の目的・意義

本研究では、次世代の無線ネットワーク、特に 802.11ac を対象にネットワーク全体と各ユーザのスループット性能を向上する事を目的として、

1. 他通信とのチャネル競合時のチャネルボンディング機能の実装タイプ毎の性能調査、及びそれに基づく性能向上手法
2. チャネルボンディングを有効利用する A-MPDU サイズの動的調整手法
3. 端末の接続後のスループット最大化を実現する端末指向の AP 選択手法

を提案した。以下にそれぞれの手法について説明する。

2 研究の背景

近年、M2M (Machine-to-Machine) や Internet of Things (IoT) 技術の発展と普及に伴い、無線通信モジュールを搭載した機器が爆発的に増加すると予測されている。現状の IoT サービスは、全ての IoT データをインターネット上に設置されたクラウドサーバに一度蓄積した上で活用している。OECD (経済協力開発機構) によると M2M デバイス数は 2020 年までに 530 億台にまで達すると想定されている。各 IoT デバイスからサイズが小さく且つ用途が異なる膨大な数のデータが発生すると考えられる一方で、無線アクセスネットワークは 1 台の端末に対するスループットの広帯域化を進めており、無線 LAN (Wi-Fi) における IEEE 802.11ac (Wi-Fi5) 規格では理論最大 6.93Gb/s、最新の IEEE 802.11ax (Wi-Fi6) では理論最大 9.6GB/s を実現している。このように、今後は異なる通信要求が混在することは避けられない状況に対して、現在の無線通信規格では利用チャネルの分離による解決策が検討されている。しかし、AP による利用チャネルの決定や端末による接続先 AP 選択は通信モジュールを製造するベンダーの実装依存であるため、同一空間上に多様なデバイスが混在する実環境では、効率的な無線資源の利用は不可能な状況といえる。

そこで研究代表者は、異なる通信要求が同一チャネル上で混在する環境に着目し、AP 側で自身の接続端末の通信状況 (スループット、遅延) を考慮して、QoE を満足可能な利用チャネル幅、送信フレーム (A-MPDU) サイズの動的決定方針を検討している。具体的には、隣接する複数チャネルを利用するチャネルボンディングの効果的な利用方法が競合通信の利用状況に応じて大幅に変化する点に着目している。これに加え、端末側では、全チャネルの利用状況を観測し、QoE を満足可能な AP を自律的に選択する手法を検討してきた。本研究では、別途検討してきたこれらの手法が互いに連携協調することで、更に無線資源を有効利用できると考え、それぞれの手法の改善だけでなく、互いの依存関係や適切な制御間隔、優先度を考慮して連携する手法を研究する。

3 提案手法

3-1 他通信とのチャネル競合時のチャネルボンディング機能の実装タイプ毎の性能調査、及びそれに基づく性能向上手法

IEEE802.11ac (以下, 11ac) の通信高速化技術の 1 つに IEEE802.11n から標準化されているチャネルボンディング機能がある。これは、物理通信帯域を拡大させるために隣接する複数のチャネルをまとめて利用する技術である。しかし、複数チャネルを利用するため、他の無線 LAN 機器との競合が発生しやすい環境となる。なお、無線 LAN 機器との競合や干渉を避けるために、Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) を利用している。また、利用する全チャネル上で送受信端末が拡張 Request To Send (RTS) / Clear To Send (CTS) フレームを利用する CSMA/CA with RTS/CTS 機構がある。しかし、この機構はオプション機能であるため、製造メーカーによって実装方法が異なっている。

これまでの先行研究[1]より、製造メーカーによってオプション機能である拡張 RTS/CTS の実装方法が異な

るため、その実態を調査するために複数の AP を使用して競合しない環境における通信実験を行った。その結果、以下の 3 パターンに分類されることがわかった（図 1）。

- パターン 1 (Pt. 1)：RTS/CTS を利用
- パターン 2 (Pt. 2)：RTS/CTS を利用しない。
- パターン 3 (Pt. 3)：CTS-to-self を利用。

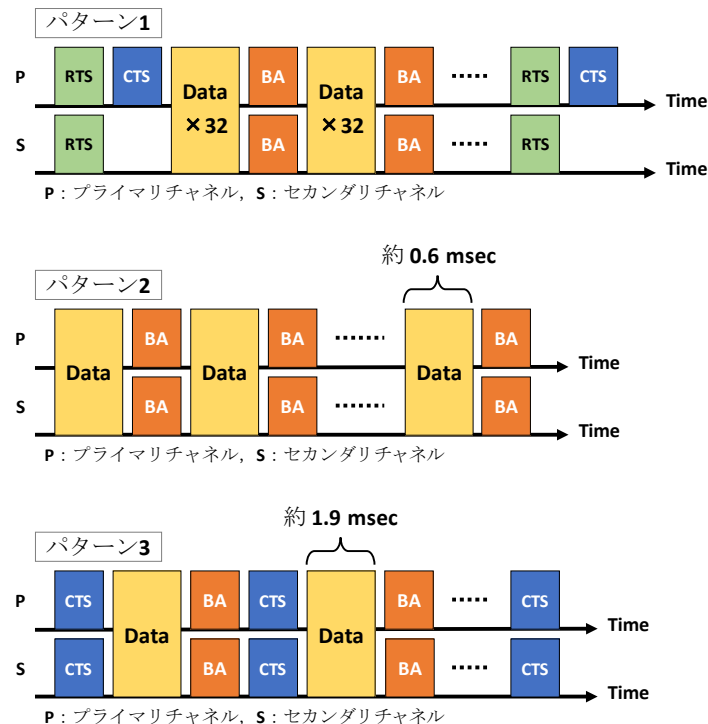


図 1：無線 LAN 機器の通信手順

また、CSMA/CA with RTS/CTS 機構を用いてチャネルボンディングを行う AP に対して、チャネルボンディングしない AP が競合する場合の通信性能の調査[2]において、競合チャネルがプライマリチャネルでもセカンダリチャネルでも双方の AP における通信性能への影響に大きな差がないことがわかった。しかし、RTS を利用せず CTS-to-self を用いてチャネルボンディングを行う AP のボンディング幅内で競合が発生する場合の通信性能は明らかになっていない。

そこで本研究では、チャネルボンディング機能を有する CTS-to-self の AP に対して、通信手順の異なる 3 パターンの AP をチャネルボンディングせずにそれぞれ競合させた場合の通信性能の調査を行った。このとき 80MHz でチャネルボンディングする AP のプライマリチャネルとセカンダリチャネルの合計 4 チャネルを競合チャネルとした場合の双方の AP への通信性能の影響を示し、CTS-to-self を用いてチャネルボンディングする AP や競合する AP を設置するときの各 AP のチャネル設計などについて議論する。

(3-1-1) 実験環境と性能指標

本研究では、CTS-to-self で 80MHz 幅のチャネルボンディング (Channel Bonding, CB) 機能を有する Pt. 3 の AP (以降、AP (w/ CB)) に対して、Pt. 1~Pt. 3 の通信手順の異なる 20MHz の AP (以降、競合 AP) が競合する場合における通信性能への影響を調査する。図 2 に実験構成を示す。AP (w/ CB) は 100ch をプライマリチャネルに設定し、各チャネルに対して競合 AP を設定する。以降、Pt. 1、2、3 の競合 AP が競合する場合を Case1、2、3 とする。

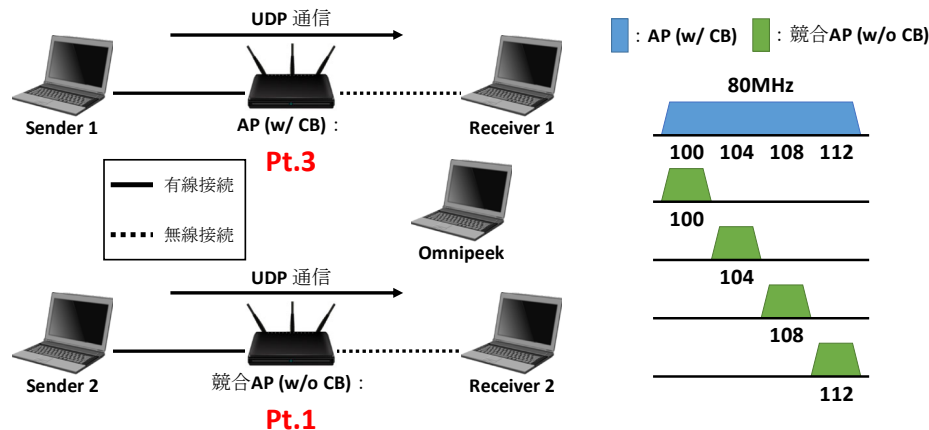


図 2: 実験構成と競合チャネル位置

実験手順として、送信側と受信側の PC ではスループット計測ソフトの iperf3 を用いて 1470 バイトの UDP フローをチャネル幅に応じた最大伝送レートに合わせて 30 秒間送信する。実験は 5 回行い、無線通信の様子を計測するために Omnipeek を用いて、チャネル毎に発生するフレームをキャプチャして分析を行った。また、競合実験を行う前に、20MHz の競合 AP (Pt. 1～3) の信号強度を調査するために、スペクトラム計測ソフトの AirMagnet Spectrum XT を用いて計測した。

本研究では競合時における双方の通信性能の公平性に着目する。スループットに関する性能指標として、以下の式を用いて競合時の通信性能を評価した。まず、競合しない環境のスループットを「競合前スループット」とすると、「理想スループット」は競合前スループットを共存する AP の台数 N で除算した値とする。そして、競合時のスループットの実測値を理想スループットで正規化したスループットを性能指標とする。

- 理想スループット = 競合前スループット / N (N : AP の台数)
- 正規化スループット = 競合時スループット / 理想スループット

(3-1-2) 実験結果

(1) 競合 AP (w/o CB) のスペクトラム調査

最初に、本実験で使用した競合 AP の Pt. 1、Pt. 2、Pt. 3 の競合しない環境におけるスペクトラムを図 3 に示す。図 3 に示している横軸はチャネル、縦軸は電力 [dBm] を表している。また、ここでは、108ch に設定した場合のスペクトラムを示している。図 3 より、各競合 AP の電波は 100ch、104ch にまで漏れていることがわかった。104ch 上ではどの競合 AP も -65dBm 以上の電波が届いているが、100ch においては Pt. 1 は約 -90dBm、Pt. 2、3 は約 -85dBm の電波が届いていることを確認した。このことから、競合 AP の信号は、利用チャネルの左隣のチャネルにおいて -82dBm または -72dBm の閾値でボンディングする AP から信号を検出される可能性があり、2 チャネル離れたチャネルでも SD-th で示される -82dBm の閾値を超える可能性があることがわかった。

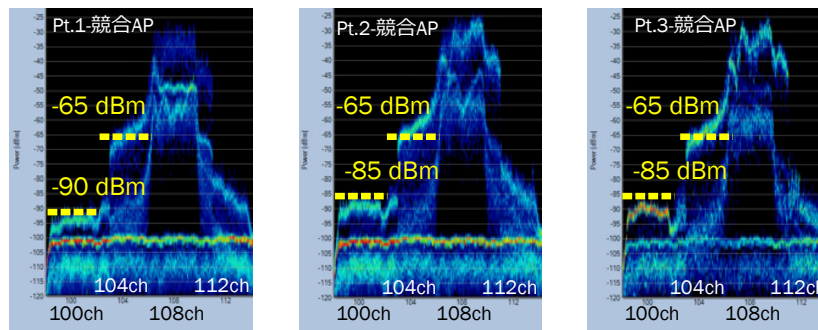


図 3: 108ch に設定した競合 AP (w/o CB) のスペクトラム

(2) AP (w/ CB) の動作検証

本実験において、競合時における厳密な評価を行うために、実験に使用する AP (w/ CB) の動作を調査した。図 4 には 80MHz のボンディング幅内に Pt. 1 の競合 AP が 112ch で競合した場合における双方のフレーム送信時間を示している。図 4 では横軸に経過時間を示しており、AP (w/ CB) と競合 AP が送信したフレームが送信されている実時間を直線で示している。図 4 の結果から競合 AP が 112ch 上で通信している間であっても、AP (w/ CB) が同時に通信していることがわかった。このとき、108ch や 112ch には AP (w/ CB) の CTS や Block Ack は発生しておらず、20MHz または 40MHz に縮小して通信していることを確認した。このことから、AP (w/ CB) はダイナミックチャネルボンディングをしていることがわかった。また、CTS に設定されている Duration time は 0s であることから、本実験で使用した AP (w/ CB) に用いられる CTS は、他の競合 AP に NAV 期間を通知するためでなく、自身が利用するチャンネルの状況を確認するためのフレームであることがわかった。

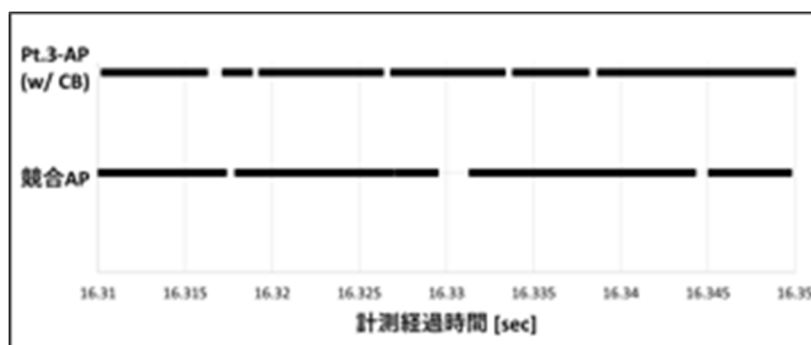
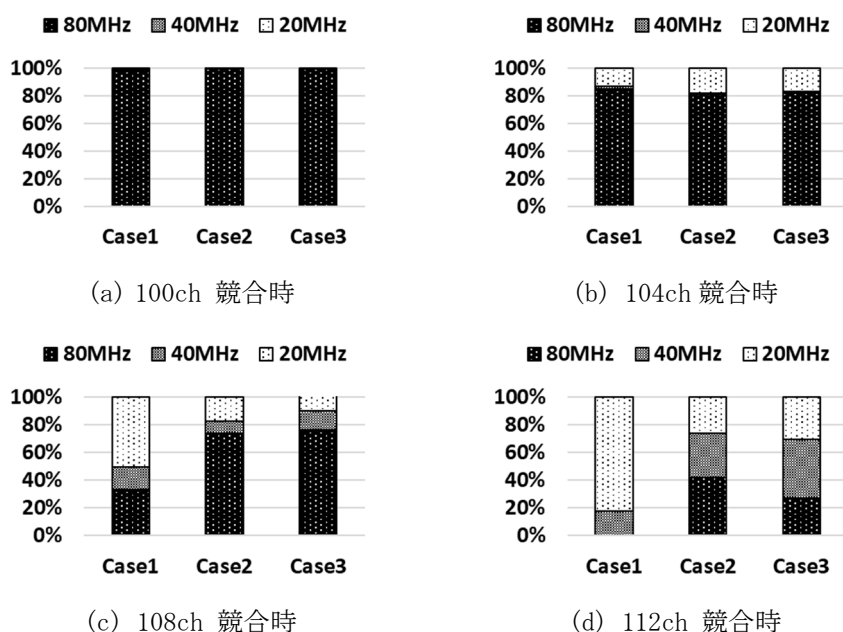


図 4: 112ch 競合時に各 AP が送信したデータフレームのフレーム送信時間

(3) 80MHz 幅内の競合時における通信性能

上記の検証結果を踏まえて、競合時の通信性能について調査した。図 5 に競合 AP の通信手順が異なる Case1～3 における AP (w/ CB) のボンディング幅の使用率を競合 AP が共存するチャンネル別に示す。



(a) 100ch 競合時 (b) 104ch 競合時
(c) 108ch 競合時 (d) 112ch 競合時
図 5: 競合チャンネル別の AP (w/ CB) のボンディング幅使用率

100ch 競合時: 競合 AP はプライマリチャンネル上の競合であるため、図 5(a) より Case1～3 においてボンディング幅は縮小されず 80MHz の通信のみであることを確認した。

104ch 競合時: AP (w/ CB) はセカンダリチャンネル上で PIFS 間のキャリアセンスが行われる。また、CTS は NAV 期間を通知しないため、競合 AP は通信を続行することができる。よって、競合 AP を検知した

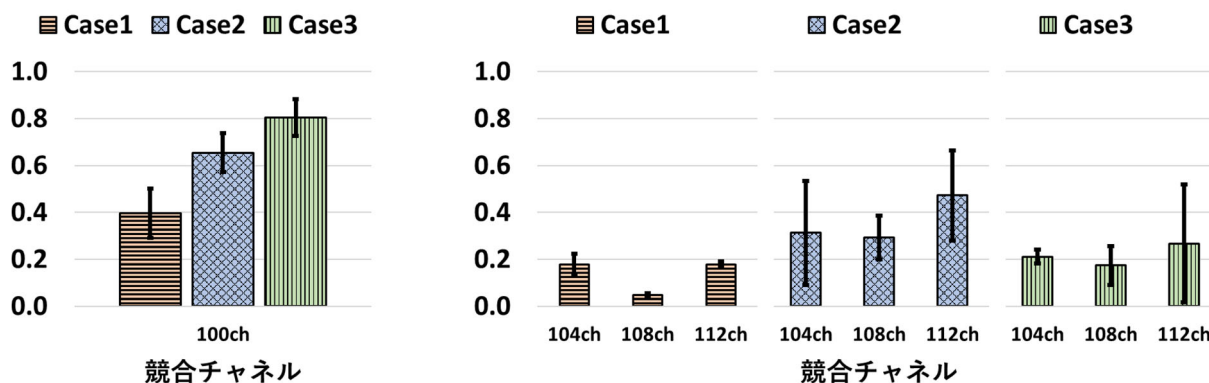
AP(w/ CB)は図 5(b)の Case1～3 のように、20MHz の通信をしていることがわかった。しかし、20MHz の通信に対して、80MHz の通信が約 80%以上も占めている。この原因は、図 3 のように 104ch に設定した競合 AP は、隣の 100ch に約-65dBm の電波が漏れており、AP(w/ CB)のプライマリチャネルの CCA 閾値は-82dBm であるため、プライマリチャネル上でキャリアセンスされるからである。

108ch 競合時:図 5(c)より、Case1 の 20MHz の使用率が Case2、3 よりも高いことがわかった。セカンダリチャネルの CCA 閾値は-72dBm であり、競合 AP の電波は図 3 より、104ch に約-65dBm の電波が漏れているため、キャリアセンスで検出することができる。また、競合 AP の A-MPDU、1 つ当たりの通信時間に着目すると表 1 のように Case1 の通信時間が最も長く PIFS 間のキャリアセンスで検出されやすいことがわかった。一方、Case2、3 の 80MHz の使用率が 70%以上ある原因は競合 AP の電波が 100ch に約-85dBm の強度で漏れているからである。AP(w/ CB)のプライマリチャネルの CCA 閾値は-82dBm であるため、競合 AP の電波が 100ch 上で偶発的に-82dBm 以上で漏れていた可能性がある。よって、AP(w/ CB)はプライマリチャネル上のキャリアセンスで検出することができることがわかった。ただし、Case1 においては、100ch 上の電波は約-90dBm でありプライマリチャネル上のキャリアセンスでは検出することが難しいため、80MHz の通信の割合が Case2、3 よりも低くなった。

表 1: 競合 AP の A-MPDU あたりの通信時間

競合 AP	通信時間 [ms]
Case1	4.6
Case2	0.6
Case3	1.9

112ch 競合時:競合 AP の電波は 100ch まで届かないため、プライマリチャネルのキャリアセンスでは検出されない。そのため、AP(w/ CB)は競合 AP の A-MPDU 送信直後の時間に PIFS 間のキャリアセンスでアイドル状態であると判断する必要がある。表 1 の A-MPDU の通信時間に着目すると、Case2 の場合が最も短いことがわかった。そして、図 5(d)に着目すると、80MHz の通信が Case1、3 よりも高く約 40% の割合で通信していることがわかった。また、Case1 は 112ch で競合しているにもかかわらず、20MHz の通信が 80%以上占めている。Cyclic Redundancy Check (CRC) エラーに着目すると、20MHz 通信時のエラー率は約 0.29%に対して、40MHz 通信時のエラー率は約 0.72%と 2 倍以上になっていることがわかった。つまり、AP(w/ CB)が保守的に通信を行うために、20MHz 通信の割合が高くなることがわかった。



(a) プライマリチャネル (100ch)競合時 (b)セカンダリチャネル(104、108、112ch)競合時
図 6 AP(w/CB) の正規化スループット

次に、AP(w/ CB)の正規化スループットをプライマリチャネル競合時とセカンダリチャネル競合時でそれぞれ図 6(a)と図 6(b)に示す。図 6(a)より、Case1 の正規化スループットが最も小さいことがわかった。これは AP(w/ CB) の A-MPDU、1 つ当たりの通信時間と関係する。AP(w/ CB)の通信時間は約 1.9ms に対して、Case1 の競合 AP の通信時間は表 1 より、4.6ms であるため、Case1 の場合は競合 AP によって通信時間が占有されていることがわかった。また、セカンダリチャネル競合時、全チャネル上で AP(w/ CB)の CTS が返送されても NAV 期間を通知しないため競合 AP と衝突しやすくなる。また、AP(w/ CB)は

ダイナミックチャネルボンディングで動作するため、Case1～3 における図 6(a)のプライマリチャネル競合時と比べると図 6(b)のセカンダリチャネル競合時の性能はそれぞれ低くなることがわかった。

(3-1-3) 考察

以上の結果から、CB を利用して無線 LAN を運用する際の競合環境における AP やチャネル設定による改善について考察する。AP(w/ CB)が 80MHz で既に運用している場合、セカンダリチャネル上の競合は双方の通信性能に影響する。そこで競合 AP は、AP(w/ CB)のプライマリチャネルに設定することで双方の通信性能の公平性を保つことができる。一方で、競合 AP が不特定に存在する環境内で AP(w/ CB)を設置する場合、セカンダリチャネルで競合が発生する可能性がある。その場合は双方の通信性能に悪影響を及ぼすため、80MHz のチャネルボンディングでの運用は控えるべきであることが確認できた。

(3-1-4) まとめ

本研究では、CTS-to-self の AP がチャネルボンディングした場合の競合発生時における通信性能を調査した。その結果、本実験で使用した Pt.3 の AP はダイナミックチャネルボンディングで動作していることがわかった。また、「通信性能の公平」を考慮した場合、プライマリチャネル上で競合させた方が双方の通信性能への影響は低減できることがわかった。ただし、RTS/CTS を利用することでセカンダリチャネル上の競合時においても通信性能への影響は低減される。これらの研究成果に関して、3 件の国内研究会（2 件は日本語セッション、1 件は英語セッション）にて発表し、対外的に研究成果を公表した。また、その内の 1 件は電子情報通信学会ネットワークシステム研究会の若手研究奨励賞を受賞した。

3-2 チャネルボンディングを有効利用する A-MPDU サイズの動的調整手法

11ac の高速化技術の一つであるチャネルボンディングでは、連続した複数のチャネルを束ねて利用することで高速通信を実現している。しかし、実際の無線 LAN 環境においては、その利用機器数の増加により、複数機器間のチャネル競合は避けられない。そのため、使用チャネルの重複により競合が発生し、通信性能が低下する可能性がある。11ac チャネルボンディングでは通信相互に発生するチャネル競合を抑制するための機能として、スタティックチャネルボンディング（以下 SCB）とダイナミックチャネルボンディング（以下 DCB）が採用されている。DCB はボンディングするチャネルのいずれかに競合する通信が存在する場合、その時点で利用可能なチャネル幅に縮退させることで競合を回避しつつ通信を行うため、チャネル競合時においてもある程度の通信性能を維持することが可能である。しかし、11ac によるフレーム伝送においては、チャネルの縮退による伝送速度の低下だけではなく、各 AP により異なる A-MPDU サイズの差が原因で、1 フレーム毎の送信時間にばらつきが発生する可能性がある。これにより、各通信の性能に差が生じる Performance Anomaly (PA) 問題[3]が発生する可能性がある。そこで本研究では、効果的な DCB のための適切な A-MPDU サイズ動的決定手法を提案した上で、様々な競合環境下における性能を評価し、最適な A-MPDU サイズの決定手法の適用性をシミュレーションにより検証する。

(3-2-1) 提案手法:A-MPDU サイズ動的決定手法

11ac によるフレーム伝送では、DCB のチャネルの縮退による伝送速度の低下だけではなく、各 AP により異なる A-MPDU サイズ(上記(3-1)参照)の差によって、フレームの占有時間は通信毎に異なる可能性がある。そのため、Performance Anomaly (PA)問題[3]が発生する可能性がある。PA 問題を解決するために、競合する通信との公平性を維持することが目標となるため、DCB ではチャネル縮退時のフレーム送信時間を考慮する必要がある。例えば、DCB において、小さい A-MPDU サイズを用いる場合、単位時間あたりのフレーム送信機会が増加し、広チャネル幅を利用できる確率が高くなるが、その際の送信データ量は少なくなる。逆に、大きな A-MPDU サイズを用いる場合、広チャネル幅を利用できる確率が低くなるが、その際の送信データ量は多くなる。つまり、広チャネル幅で通信を行う確率とその際の送信データ量はトレードオフの関係となる。

本研究では先行研究[4]をベースとして最適な A-MPDU サイズを導出した。まず、チャネル「S1」上に競合通信が一つだけ存在する状況（図 7）を想定し、競合時の各通信の要求を下記の様に定める。

- 通信 2 の要求：単体時のスループット性能の 50%を維持する。
- 通信 1 の要求：通信 2 の要求を満たすと同時に、自身のスループットを向上する。

図7において、チャンネル「S1」上に競合相手が存在するため、単位時間あたりのチャンネル「S1」の利用時間を、通信1と通信2で等しくすることで通信2の要求を満たす。加えて、通信1の広チャンネル幅での通信時間を増加することで、通信1のスループットの向上を目指す。この通信2の要求を満足するためには、通信1の80MHzでの「通信回数とAirtime」を調整する必要がある、これは通信1の20MHz利用時の通信時間(Airtime:AT)、すなわち、A-MPDUサイズによって決まる。

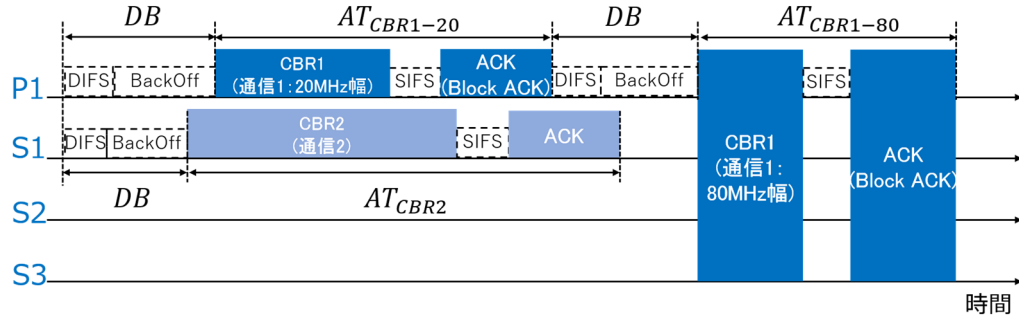


図7：80MHz-20MHz DCB 時における各値の定義

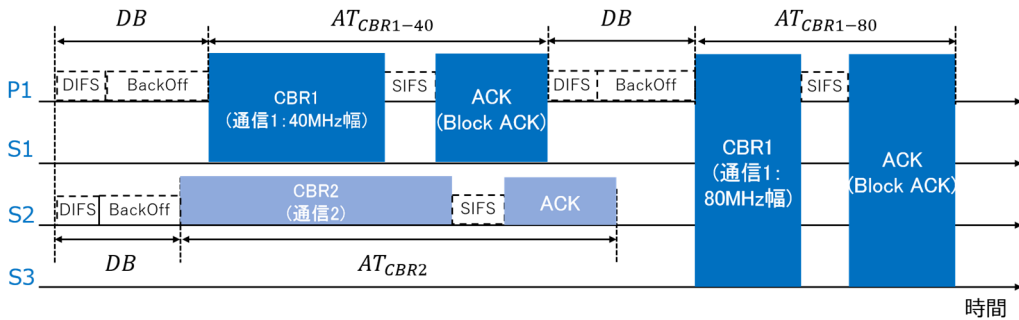


図8：80MHz-40MHz DCB 時における各値の定義

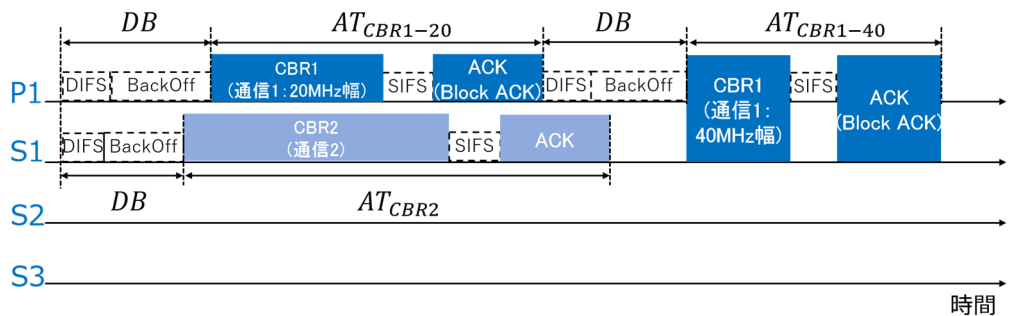


図9：40MHz-20MHz DCB 時における各値の定義

各パラメータを以下の様に定義する。

- DB : DIFS 時間+Backoff 時間
- $AT_{CBR1-20}$ ($AT_{CBR1-80}$) : 通信1が20(または80)MHz幅で送信する際の1フレーム送信時間
- AT_{CBR2} : 通信2の1フレーム送信時間

ただし、1フレーム送信時間は、データフレーム送信時間とACK受信時間の合計とする。さらに、下記の計算では、1フレーム送信時間に DB を含むものとする。また、 $AT_{CBR1-20} \geq AT_{CBR2}$ の場合に限定して考える。ここで、 $AT_{CBR1-20}$ を入力パラメータとし、通信1、2の要求を満足する $AT_{CBR1-80}$ を求めるために、以下の計算を行う。 $AT_{CBR1-80}$ に対する通信2のチャンネル「S1」の使用時間を $TIME_{C2}$ とすると、チャンネル「S1」の利

用時間を、通信 1 と通信 2 で等しくする必要があるため、以下の式が成り立つ。

$$AT_{CBR1-20} = TIME_{C2} = AT_{CBR2} \times (TIME_{C2} \text{ 内の通信 2 の送信回数})$$

このとき $TIME_{C2}$ 内の通信 2 の送信回数を x とすると、

$$x = \frac{AT_{CBR1-20}}{AT_{CBR2}} \quad (1)$$

と表すことができ、 x は CBR1 の 20MHz 時の 1 フレーム送信時間と、CBR2 の 1 フレーム送信時間に依存する。次に、 $TIME_{C2}$ 内の通信 2 の送信回数を x の期待値 E_x で表す。チャンネル「S1」において通信 1 と通信 2 が同時にフレーム送信を終了し、通信 1 が送信権を獲得する確率は、「1/競合する通信の数」で表されるため 1/2 となる。CSMA/CA による送信手順により、通信 2 が連続で送信権を獲得する度に通信 2 の送信回数は増加し、 E_x は以下の様に表せる。

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{1}{2}x + \frac{1}{4} \times 2x + \frac{1}{8} \times 3x + \dots + \left(\frac{1}{2}\right)^n \times nx \\ &= 2x \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)、(2)より、 $AT_{CBR1-80}$ は、 $AT_{CBR1-20}$ を用いて以下のように示すことができる。

$$AT_{CBR1-80} = 2AT_{CBR1-20}$$

現実環境では、送信権は各通信がランダムに獲得するため、送信権獲得回数に多少の偏りが生まれる。通信 2 の送信回数が少なくなってしまうと、単体時の 50% の性能を達成できないため、以下のように AT_{CBR2} を引くことで適切な $AT_{CBR1-80}$ の値を小さめに設定する。

$$AT_{CBR1-80} = 2AT_{CBR1-20} - AT_{CBR2} \quad (3)$$

最後に、1 パケットあたりのメッセージセグメントサイズを MSS 、80MHz 幅の伝送レートを R_{80} とし、式(3)から、80MHz 通信時の適切な A-MPDU フレームサイズ $PKT_{CBR1-80}$ を以下により算出する。

$$PKT_{CBR1-80} = AT_{CBR1-80} \times \frac{R_{80}}{MSS} = (2AT_{CBR1-20} - AT_{CBR2}) \times \frac{R_{80}}{MSS} \quad (4)$$

さらに、図 8、図 9 に示すように、通信 1 と通信 2 のボンディング幅を変化させた場合における A-MPDU サイズを上記と同様に計算する。その結果、80MHz-40MHz が競合した場合、40MHz-20MHz が競合した場合の A-MPDU サイズを導出しても(4)と同様の式で求めることが可能であることを確認した。

(3-2-2) A-MPDU サイズ決定手法の適用性検証

本節では、DCB を利用可能に拡張したシミュレータ Scenargie 2.2 を用いて、前節で述べた A-MPDU サイズ決定手法の適用性の検証を行う。シミュレーション環境を図 10 に示す。11ac の AP (送信者) 2 台には、それぞれ距離 5m の地点に接続する STA (受信者) を配置し、二つの通信を混在させる。AP1 から STA1 への通信を通信 1、AP2 から STA2 への通信を通信 2 とし、通信 2 を競合する通信とする。通信 1 はプライマリチャンネルを 100ch とし、図 8 の環境では最大で 80MHz 幅、図 9 の環境では最大で 40MHz 幅の DCB を行う。通信 2 は図 8 の環境では 108ch、図 9 の環境では 104ch のみで通信を行う。各通信とも、それぞれ 1 パケット 1460Bytes の CBR フローを 10 秒間発生させる。このとき、通信 1 の A-MPDU サイズの調整による影響を調査するため、通信 1 は A-MPDU を使用するが、通信 2 は使用しない。A-MPDU 使用時は、最大で 64 パケット分のデータを一括送信できる。また、変調方式は、20MHz 幅通信時は 256QAM3/4、40MHz 幅通信時、80MHz 幅通信時は 256QAM5/6 とし、ショートガードインターバルを用いる。そのため、伝送レートは 20MHz 幅のときは 86.7Mbps、40MHz 幅のときは 200.0Mbps、80MHz 幅のときは 433.3Mbps となる。シミュレーションは、シード値をランダムに変えて 10 回行い、平均値を結果として用いた。

式(4)の 80MHz-40MHz DCB 時、40MHz-20MHz DCB 時における適用性を検証するため、固定の A-MPDU フレームサイズを用いた手法 (既存手法) を比較手法とする。提案手法では、利用可能なチャンネル幅に合わせて A-MPDU サイズを動的に調整することで、広チャンネル幅での通信を有効活用することを目標とする。このとき、競合チャンネルの利用時間を、通信 1 (最大ボンディング幅通信) と通信 2 で等しくすることで通信 2 の要求を満たすようにするため、各通信の競合チャンネルの利用時間を評価指標として用いる。さらに、通信 2 の競合時スループットが単体時スループット性能の 50% を維持するという要求を満たす範囲内で、DCB を行う通信

の通信性能を向上させることを目標とするため、各通信のスループットを評価指標として用いる。

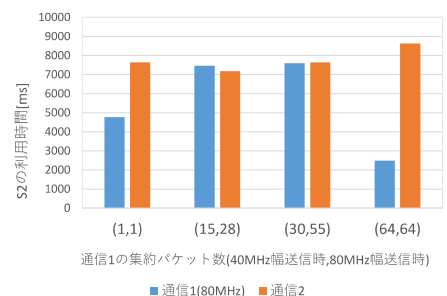
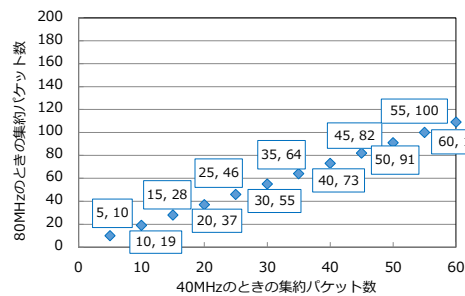
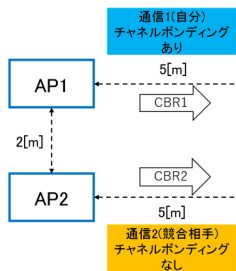


図10:シミュレーション環境 図11:最適なA-MPDUサイズ組み合わせ 図12: 通信1(80MHz)と通信2のチャンネル「S2」の利用時間(80MHz-40MHz DCB時)

まず、図8の環境の場合における最適なA-MPDUサイズから求めた(図11)。この最適なA-MPDUサイズを用いた際の通信1と通信2のチャンネル利用時間を図12に示す。横軸の値を(通信1の競合時A-MPDUサイズ、通信1の最大ボンディング時A-MPDUサイズ)としたとき、(15,28)および(30,55)の場合は、通信1の80MHz幅のチャンネル「S2」の利用時間と通信2のチャンネル「S2」の利用時間の偏りが既存手法と比較して小さくなっていることがわかる。よって、通信1(80MHz)と通信2は競合チャンネル「S2」を公平に利用できていることが分かる。また、図13に通信1、通信2のスループットのシミュレーション結果を示す。既存手法の通信1の結果に着目すると、ボンディング時に64パケットで固定して送信する時、高いスループットを示している。これは、A-MPDUフレームサイズが大きいことにより、送信データ量が多くなり、オーバーヘッドが削減できるためである。一方、既存手法でボンディング時にフレーム集約を用いない場合は、低いスループットを示している。これは、フレーム集約を用いていないことにより、送信データ量が少なくなり、オーバーヘッドが削減できないためである。さらに、既存手法でスループットが高い64パケットの場合と提案手法を比較すると、(15,28)の組み合わせでも既存手法の64パケットのスループットとほぼ一致し、集約数が大きくなると提案手法が上回っている。これにより、提案手法によって通信1の性能が向上できていることが分かる。一方で、通信2の単体時(DCBなし、フレーム集約なし)のスループットの50%は16.87Mb/s[4]であるため、提案手法の通信2のスループットのシミュレーション値は単体時のスループット性能の50%以上を達成できている。つまり、図8の環境において、A-MPDUサイズ決定手法が適用可能であり、通信1は通信2の要求を満たしつつ、80MHz幅での通信を活用できているといえる。

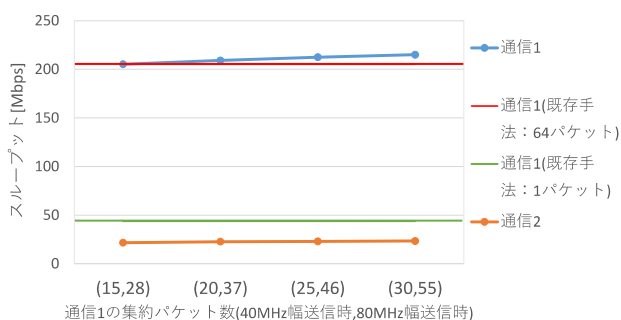


図13: 通信1と通信2のスループット(80MHz-40MHz)

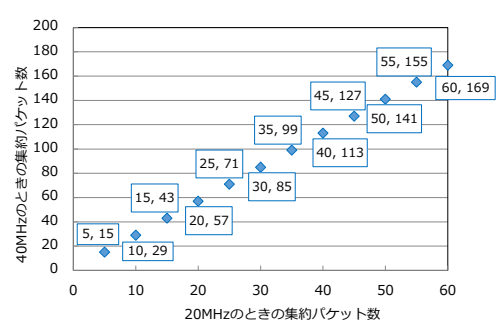


図14:最適なA-MPDUサイズ組み合わせ(80MHz-20MHz DCB時)

次に、図9の環境の場合における最適なA-MPDUサイズを求めた(図14)。図15に、このA-MPDUサイズを用いた際の、通信1(40MHz幅通信)、通信2のチャンネル「S1」の利用時間を示す。この結果から、提案手法を用いた(5,15)および(20,57)に着目すると、通信1の80MHz幅のチャンネル「S1」の利用時間と通信2のチャンネル「S1」の利用時間の偏りが図8の環境と同様に提案手法によって小さくなっている事が分かる。よって、通信1(40MHz)と通信2は競合チャンネル「S1」を公平に利用できていると言える。また、図16に、通

信 1、通信 2 のスループットを示す。図 16 において、既存手法の通信 1 の結果に着目すると、ボンディング時に 64 パケットで固定して送信する時、高いスループットを示しており、既存手法でボンディング時にフレーム集約を用いない場合は、低いスループットを示している。これは前述した図 8 の環境の結果と同じ傾向を示しており、原因も同様である。さらに、図 8 の環境と同様に集約数が大きくなると提案手法のスループットが上回っていることから、提案手法によって通信 1 の性能が向上できていることが分かる。一方で、通信 2 の単体時（DCB なし、フレーム集約なし）のスループットの 50% は 16.87Mb/s[4] であるため、提案手法の通信 2 のスループットのシミュレーション値は単体時のスループット性能の 50% 以上を達成できている。つまり、図 9 の環境においても A-MPDU サイズ決定手法が適用可能であり、通信 1 は通信 2 の要求を満たしつつ、40MHz 幅での通信においても活用できている。

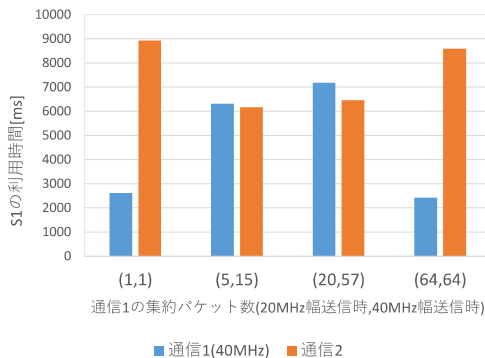


図 15: 通信 1(40MHz)と通信 2 の
チャンネル「S1」の利用時間

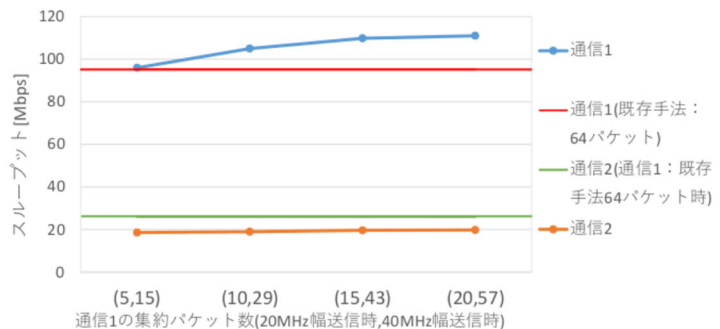


図 16: 通信 1 と通信 2 のスループット (80MHz-20MHz)

(3-2-4) まとめ

本研究では、80MHz-20MHz DCB の環境を想定した適切な A-MPDU サイズの導出式を提案し、80MHz-40MHz DCB、40MHz-20MHz DCB の環境において、提案手法の適用性をシミュレーションにより検証した。その結果、提案手法によって最適な A-MPDU サイズを用いて通信を行うことで、様々な DCB 環境において、競合する 2 通信が競合チャンネルを公平に利用できていることを示した。これらの研究成果に関して、1 件の国内研究会、及び 1 件の国際会議にて対外発表を行った。

3-3 端末の接続後のスループット最大化を実現する端末指向の AP 選択手法

現在の無線 LAN において、ユーザ端末(STA)が AP に接続する際は、近隣の AP から定期的にブロードキャストされるビーコンを受信し、その中で受信信号強度(RSSI)が最も大きい AP を 接続先として選択する手法(以降、RSSI 手法)が一般的である。しかし、この手法は RSSI のみを基に選択先を決定するため CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)による通信待機時間の増加や隠れ端末問題によるフレーム衝突に起因するスループットの低下を考慮できない。

また、無線 LAN では通信品質を保つために、AP と STA 間の電波環境(通信距離、遮蔽物、雑音)に応じて適切な伝送レートを選択し、使用する適応レート制御を行っている。その一方で、チャンネルアクセス制御方式として CSMA/CA を用いるため、各 STA の伝送レートに関係なく、通信機会が平等に与えられる。その結果、異なる伝送レートで通信を行う STA が複数存在する環境では、Performance Anomaly (PA) 問題[2]が深刻化する。PA 問題とは、低伝送レートで通信を行う STA がフレーム送信に際してチャンネルを長時間占有する(フレーム転送完了時間: Airtime が長い)ことにより、他の高伝送レートで通信可能な STA がチャンネルを有効に活用できないため、無線 LAN 全体のスループットが低下してしまう問題である。特に IEEE802.11ac 等の最新規格では、AP/STA 共にチャンネルボンディングや A-MPDU、MIMO などの無線通信高速化技術を標準で利用するため、伝送レートやフレームサイズが AP/STA 毎に、さらには時間毎にも複雑に変化することとなる。よって、稠密無線 LAN 環境では、AP と STA のペア毎に伝送レートやフレームサイズが異なる多種多様な通信が混在する。このような環境では、通信毎の Airtime の差が大きくなり、PA 問題によるスループット低下が更に深刻化すると考えられる。

そこで本研究では、STA が各 AP から受信するビーコンから得られる情報を基に、CSMA/CA による通信待機時間の増加や隠れ端末問題によるフレーム衝突の影響を考慮して AP を選択する。さらに、フレーム送信時には、自身の伝送レートに応じて、A-MPDU フレームサイズを変更することで、Airtime Fairness の実現と自身のスループットの向上を目指す AP/STA 協調型 AP 選択手法を提案する。本稿では、提案手法の有効性を現実環境を想定したシミュレーション実験を通じて評価する。

(3-3-1) 提案手法：Airtime Fairness-Maximizing Throughput (AF-MT)

本論文では、STA 主導の新しい AP 選択手法である Airtime Fairness-Maximizing Throughput (AF-MT) を提案する。AF-MT 方式は、関連研究[5]の問題点(伝送確率取得、大規模なオーバーヘッド、PA 問題)を解決しつつ、適切な AP を選択する手法である。以下に詳細を記述する。

従来の無線 LAN における一般的な RSSI ベースの方式ではスループット性能を保証できない。また、近年の Wi-Fi 機器では、802.11ac 技術に基づく Very High Throughput (VHT) 技術(チャネルボンディングや A-MPDU) が採用されているため、PA 問題の影響がより強くなっている。そこで本稿では、(a) PA 問題を回避するために各ノード間の通信時間に対する公平性の実現、(b) ネットワーク全体における STA のスループット性能の向上、以上 2 つの要件を満たす AF-MT 方式を提案する。

AF-MT 方式は、図 3 に示すように、(1) STA の送信レートに基づいた動的な A-MPDU サイズの決定、(2) ビーコン情報を用いた接続 AP の予測スループットに基づく AP 選択、この 2 つフェーズによって構成される。

(1) まず、STA の送信レートに基づいた動的な A-MPDU サイズの決定方法について記述する。通常の無線 LAN の場合、送信するフレームサイズは一般的に固定であるが、ネットワーク内の AP と STA 間の接続によってはデータ伝送速度が異なる可能性がある((3-2)参照)。その結果、AP-STA 間の通信時間が多様であるため、PA 問題の影響が大きくなる可能性がある。

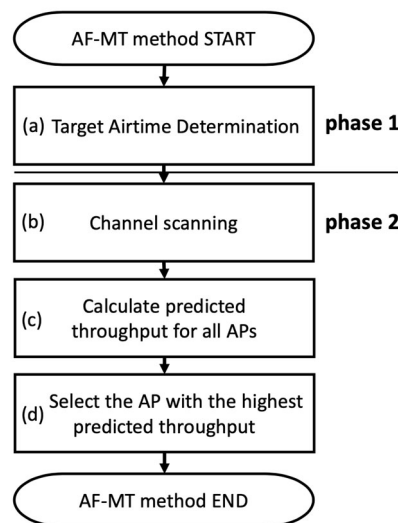


図 17: AF-MF 方式の動作フロー

(1) STA の送信レートに基づいた動的な A-MPDU サイズの決定：そこで AF-MT 方式では、最初に図 3(a) に示すように、基準となる Airtime を「Target Airtime」として定義する。利用可能な全てのチャネルにおける Airtime を公平にするために、AP や STA は、自身の伝送速度に基づいて A-MPDU サイズを動的に変化させる。このフレームサイズ適応により、全てのチャネルで運用される全ての接続の Airtime を均等化することが可能となり、Airtime Fairness を実現するとともに、PA 問題を回避することが可能となる。AF-MT 方式では、スループット性能を最大化するために、最大伝送レート（チャネルボンディングによる 80MHz 帯域）に最大 A-MPDU サイズ（42 フレーム、約 64kByte）を割り当てた場合の Airtime を Target Airtime とする。これにより、AP-STA 間の環境に応じて伝送レートが変化した場合においても、Target Airtime に近づくよう

調整可能となる。表 2 に、各伝送レートにおける A-MPDU サイズを示す。

表 2: A-MPDU サイズ (80MHz でのチャネルボンディングの場合)

伝送レート	変調、符号化方式	最大値に対する割合	A-MPDU サイズ
351Mb/s	256QAM_0.75	1	42 フレーム
292.5Mb/s	64QAM_0.83	5/6	35 フレーム
263.3Mb/s	64QAM_0.75	3/4	32 フレーム
234Mb/s	64QAM_0.5	2/3	28 フレーム
175.5Mb/s	16QAM_0.75	1/2	21 フレーム
117Mb/s	16QAM_0.5	1/3	14 フレーム
87.8Mb/s	QPSK_0.75	1/4	11 フレーム
58.5Mb/s	QPSK_0.5	1/6	7 フレーム
29.3Mb/s	BPSK_0.5	1/12	4 フレーム

(2) ビーコン情報を用いた接続 AP の予測スループットに基づく AP 選択：無線 LAN では、ネットワーク内の STA の数に比例して、通信待機時間だけでなく、CSMA/CA メカニズムに起因するフレーム損失の数も増加する。そこで、AF-MT では、スループットの低下要因である通信大気時間とフレーム衝突を考慮して、各 AP の達成可能スループットを予測する。

まず、通信待機時間の予測を行う。通信待機時間を推定するためには、同一チャネル上の他の競合 STA の数を把握する必要がある。他の STA の数を把握するためには、ビーコンフレームのオプションフィールドであるブロックサービスセットを利用する。このフィールドは、AP に属する STA の数を示すものであり、今後の利用拡大が期待される。したがって、AF-MT 方式では、各 STA は、各 AP からのビーコンに含まれている他の STA 数 N を取得することができると仮定する。Airtime Fairness が実現できた場合、STA は、式(1)から自身の通信待ち時間を予測することができる。

$$communication\ waiting\ time = airtime \times N \quad (5)$$

次に、フレーム損失率の推定を行う。フレーム損失率を推定するために、AP が定期的送信するビーコンフレームに着目する。ビーコンフレームは、接続がない状態でも所定の間隔 (100ms) で送信されるため、STA は、チャネルスキャン中に予定されているビーコン数と受信に成功したビーコン数に基づき、ビーコン損失率 p を算出することができる (図 17(b))。このビーコン損失率 p は、データフレームの推定損失率として用いられる。

最後に、図 17(c) に示すように、STA は、各 AP に接続した場合における予測スループットを計算する。予測スループット R を算出するために、STA は、送信レート R 、A-MPDU フレームサイズ L 、 N および p を用いる。表 2 を参照することにより、予測された伝送レートから A-MPDU サイズ L を決定することができる。また、各 STA は接続可能な AP 毎に、RSSI に基づいた適切な伝送レートとチャネルボンディングの帯域幅を把握できるものとする。データ送信にかかる時間を T_D 、ACK 送信にかかる時間を T_A と定義し、これらは以下の式から求めることができる。

$$T_D = \frac{L}{R} + overhead, T_A = \frac{ACK(TCP)}{R} + overhead \quad (6)$$

$$overhead = DIFS + BackOff + SIFS + \frac{ACK(MAC)}{R} \quad (7)$$

なお、 T_D および T_A には、式(7)で導出できる無線 LAN の CSMA/CA によるオーバーヘッドが含まれている。しかし、実環境ではフレームロスが発生する可能性があるため、 T_D および T_A を拡張してフレームロスの影響を考慮する必要がある。それらをそれぞれ T_D' および T_A' として定義し、以下の式より導出する。

$$T_D' = \sum_{i=0}^{\infty} p^{i-1} \cdot (1-p) \cdot i \cdot T_D = \frac{T_D}{1-p}, \quad T_A' = \sum_{i=0}^{\infty} p^{i-1} \cdot (1-p) \cdot i \cdot T_A = \frac{T_A}{1-p} \quad (8)$$

最後に、これらの式を用いて、STA が各 AP に対する接続確立後の予測スループットを計算する。

$$predictedThroughput_{TCP} = \frac{2L}{(2T_D' + T_A') \cdot (N+1)} = \frac{2L(1-p)}{(2T_D + T_A) \cdot (N+1)} \quad (9)$$

$$predictedThroughput_{UDP} = \frac{L}{(T_D) \cdot (N + 1)} = \frac{L(1 - p)}{(T_D) \cdot (N + 1)} \quad (10)$$

式(9)では、 N 個の STA と AP のそれぞれが TCP (Transmission Control Protocol) で通信する場合の予測スループットを算出する。一方、式(10)では、 N 個の STA と AP のそれぞれが UDP で通信する場合の予測スループットを算出する。図 17(d)に示すように、STA は全ての接続可能な AP に対する予測スループットを計算し、予測スループットが最も高い AP を選択する。このように、予測スループットはビーコンフレームから得られる情報のみから算出されるため、AF-MT 手法では、追加の管理フレームや通信オーバーヘッドを導入することができない。さらに、Airtime Fairness を考慮するため、PA 問題を解決することができる。

(3-3-2)シミュレーション評価

提案手法 AF-MT の有効性を検証するために、RSSI 手法を比較手法として、シミュレーションによる評価を行った。本研究では、ネットワークシミュレータ Scenargie2.2 を用いて評価を行った。シミュレーションパラメータを表 3 に示す。アプリケーションは CBR を使用し、STA は AP に対してアップリンク通信を行う。AP は、高速化通信技術対応の AP (チャンネルボンディング幅 80MHz、A-MPDU を用いる) と従来の AP (チャンネルボンディング幅 20MHz、A-MPDU を用いない) の 2 種類が混在する環境を想定し、各 AP のビーコン送信間隔は 100ms とする。ここで、高速化通信技術対応の AP と従来の AP は表 2 に示す様に異なるチャンネル上で稼働するものとする。つまり、高速化通信技術対応の AP と従来の AP 間の干渉は生じないものとする。なお、先行研究、提案手法では、各チャンネル上のフレームロス率の推定が必要となるため、各チャンネル上を 1 秒間隔で順にスキャンするように設定した。これにより、10 個のビーコンを元にフレームロス率を推定する。

表 3: シミュレーションパラメータ

シミュレーション時間	300s
アプリケーション	CBR
無線規格	IEEE 802.11ac
ビーコン送信間隔	100ms
1 チャンネルの帯域幅	20MHz
高速通信対応 AP	1, 2, 3, 4
従来 AP	5
チャンネルスキャン時間	1s/1 チャンネル
キャリアセンス範囲	120m

STA は AP 選択時に全チャンネルのフレームロス率を把握できるように、10 秒間隔でネットワークに参加するものとする。STA は AP を選択後、アソシエーション処理を行い、終了後に AP へ向けてアップリンクの CBR 通信を行う。なお通信時の A-MPDU サイズは、RSSI 手法では最大の 42 フレーム固定とするが、AF-MT 手法は表 2 に従って決定される。

シミュレーションに用いた異種 AP 混在環境のモデルを図 1 に示す。図 1 は隠れ端末問題が発生しないことを想定したモデルで、100m×100m の正方形エリア内に高速化通信技術対応の AP を 2 台、従来の AP を 2 台各辺の中央に、STA20 台をランダムに配置した。

本研究では、Airtime Fairness Index (FI) と Goal Achievement Indicator (GAI) の 2 つの評価指標を用いる。PA 問題の発生回避の判断指標として、Airtime の FI (Fairness Index) [6] を用いる。FI は値が 1 に近いほど、Airtime が公平であることを示す指標であり、以下の式で求めることができる。

$$FI = \frac{(\sum_{i=1}^k x_i)^2}{k \sum_{i=1}^k x_i^2}$$

PA 問題は Airtime の差が生じることで発生する問題であるので、Airtime に差が小さい状態、つまり Airtime の FI が 1 に近いほど、PA 問題によるスループット低下の影響を抑えることができたと判断できる。

さらに提案手法は、チャンネルボンディングを行う通信時の A-MPDU サイズを調整することで、(I)「チャンネルボンディングを行うチャンネル上の Airtime Fairness」と (II)「各 STA が最大スループットを提供する AP に接続すること」の両方を目指している。そこで、その有効性の評価指標として Goal Achievement Indicator

(GAI)を以下の式を考案した。

$$GAI = (\text{Airtime の FI}) \times (\text{最適AP 接続確率})$$

$$\text{最適AP 接続確率(OAP)} = \frac{\text{最適なAPに接続できたSTA数}}{\text{全STA数}}$$

本研究では、予測スループットが最大となる AP を最適な AP と定義する。この GAI の最大値は 1 となる。

(3-3-3) シミュレーション結果

表 3 にシミュレーションによって得られた Airtime FI を示す。この表から、AF-MT 方式を用いた場合、全てのチャンネルで Airtime Fairness が改善されていることが確認できた。AF-MT 方式では、送信レートに応じて A-MPDU サイズを調整するため、Airtime が均等化されていることがわかる。一方で、RSSI 方式の FI は 0.81 にとどまった。RSSI 方式では、STA が VHT 技術を持つ AP に接続する場合、STA の送信フレームの A-MPDU サイズが 42 フレーム長に固定されるため、同一チャンネル上に異なる伝送レートで通信する STA が存在する場合、STA 間の通信時間が変化し、PA 問題の影響が大きくなると考えられる。

次に、表 4 に AF-MT 方式の GAI を示しており、最大値 1 に近い値であることが確認できた。AF-MT 方式では、最も予測スループットが高い AP に STA を接続できるため、OAP は常に 1 となった。このように、AF-MT 方式は全てのチャンネルで通信時間の公平性を改善でき、各 STA を最も高いスループットで AP に接続するという目標を達成していることを示している。

表 3 : Airtime Fairness Index

チャンネル	FI of Airtime	
	RSSI 手法	AF-MT 手法
36 40 44 48	0.81	0.99
52	0.96	0.95

表 4: Goal Achievement Indicator (GAI)

	FI of Airtime	OAP	GAI
AF-MT 手法	0.99	1	0.99

最後に図 18 に、AF-MT 方式と RSSI 方式におけるスループット性能を示す。この結果より、AF-MT 方式が RSSI 方式と比べ、ネットワーク全体のスループットが改善していることが確認できた。AF-MT 方式では、STA が VHT 技術を用いて AP と通信を行う場合、A-MPDU サイズは伝送速度に応じて動的に変化するため、PA 問題が発生しない。そのため、非常に高い伝送レートで通信可能な STA が PA 問題の影響を受けにくいため、最大スループットが向上すると考えられる。さらに、各 STA が RSSI ではなく予測スループットを用いて AP を選択するため、VHT 技術を用いた AP に接続する STA が増加した。その結果、平均スループットと最小スループットも RSSI 方式と比較して、AF-MT 方式で改善できることがわかった。

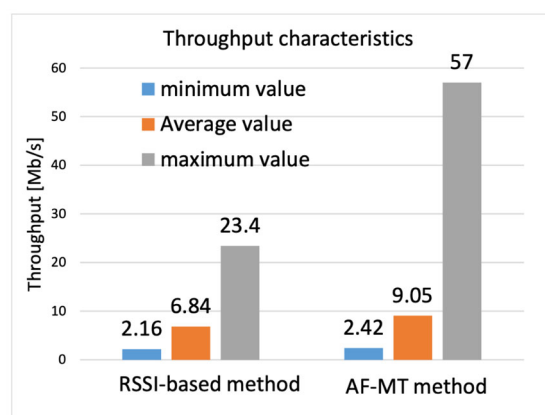


図 18: スループット性能

(3-3-4) まとめ

本研究では、STA が伝送レートに応じて A-MPDU サイズを調整することで、全チャンネル上において Airtime Fairness を実現する AF-MT 手法を提案し、シミュレーションによる評価を行った。結果より、「チャンネルボンディングを行うチャンネルで Airtime Fairness を実現できること」と「予測スループットが最大 AP を必ず

選択できること」の双方を実現できることを明らかにした。その結果、適切な AP を選択できるため、スループットの平均値、最小値を向上できることを明らかにした。これらの研究成果に関して、2 件の国内研究会（1 件は日本語セッション、1 件は英語セッションで発表し、1 件の IEEE のメジャー国際会議 CCNC にて対外発表を行った。

【参考文献】

- [1] 藤井 一樹、田村 瞳、野林 大起、塚本 和也、“IEEE802.11ac 準拠の機器におけるチャネルボンディング機能の性能評価”、“電子情報通信学会 技術研究報告、Vol. 117、 No. 131、 NS2017-43、 pp. 87-92、 2017 年 7 月。
- [2] Kazuki Fujii、Hitomi Tamura、Daiki Nobayashi、Kazuya Tsukamoto、“Experimental Investigation of Static Channel Bonding Performance in Competitive Environment – Impact of Different MAC Procedures in 802.11ac –”、Smartcom2018、 Vol IEICE-118、 No. 274、 IEICE-SR2018-58、 pp.1-2、 October、 2018。
- [3] M. Heusse, et al., “Performance Anomaly of 802.11b,” Proc. of IEEE INFOCOM 2003, pp. 836-843, 2003.
- [4] 梶原沙恵 他、“競合発生下のダイナミックチャネルボンディング を有効活用するチャネル利用方法に関する一考察”、NS 研究会、 2018 年 3 月。
- [5] Y. Zhu, et al., “User-Centric Management of Wireless LANs,” IEEE Transaction on Network and Service Management, Vol. 8, No.3, Sep. 2011.
- [6] D.-M. Chiu and R. Jain, “Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks,” Computer Network and ISDN Systems, vol. 17, pp.1-14 1989.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Station-centric Access Point Selection Method for Heterogeneous Wi-Fi Environment	Proc. of IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)	2020 年 1 月
Dynamic A-MPDU adaptation method for airtime fairness in channel bonding-ready WLANs	Proc. of 2019 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM)	2019 年 8 月
効果的なダイナミックチャネルボンディングのための A-MPDU サイズ動的決定手法 ～手法の改良と多様な競合環境下に対する適用性検証～	信学技報、 vol. 118、 no. 465、 NS2018-206、 pp. 75-80	2019 年 3 月
IEEE802.11ac チャネルボンディング機能の有効性に関する実験評価	信学技報、 vol. 118、 no. 465、 NS2018-207、 pp. 81-86	2019 年 3 月
異種 AP 混在環境において Airtime Fairnessを実現する AP/STA 協調型 AP 選択手法の提案	信学技報、 vol. 118、 no. 392、 NS2018-188、 pp. 59-64	2019 年 1 月
[Poster Presentation] Experimental Investigation of Static Channel Bonding Performance in Competitive Environment -- Impact of Different MAC Procedures in 802.11ac --	IEICE Tech. Rep.、 vol. 118、 no. 274、 SR2018-58、 pp. 1-2	2018 年 10 月
競合 WLAN が 11ac チャネルボンディングに与える影響調査	電子情報通信学会 2018 年 ソサイエティ大会、B-16-1	2018 年 9 月
Channel Bonding-Aware Access Point Selection	電子情報通信学会九州支部 学生会講演会	2018 年 9 月

〔奨励講演〕 競合発生時のスタティックチャネルボンディングの有効性に関する実験評価	信学技報 vol. 118、 no. 6、 NS2018-1、 pp. 1-6	2018 年 4 月
--	--	-------------------
